

Universidade do Minho
Escola de Ciências

Ameno Délcio João Paulino Bande

**Vulnerabilidade em Sistemas Aquíferos no
Vale de Nhartanda, Cidade de Tete,
Moçambique.**

Dissertação de Mestrado em
Geociências – Valorização de Recursos Geológicos

Trabalho efetuado sob a orientação:

Professora Doutora Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes

Professor Doutor Elónio Muiuane

Outubro de 2018

DECLARAÇÃO

Nome: Ameno Délcio João Paulino Bande

Número de aluno: PG31463

Endereço eletrónico: Ameno1000@yahoo.com.br **Telefone:** +258842506402

Passaporte: 15AH75733

Título da dissertação: Vulnerabilidade em Sistemas Aquíferos no Vale de Nhartanda, Cidade de Tete, Moçambique.

Orientadora:

Professora Doutora Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes

Co-Orientador:

Professor Doutor Elónio Muiuane

Mestrado em Geociências – Valorização de Recursos Geológicos

Ano de conclusão: 2018

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 29/10/2018.

Assinatura: _____

Índice

Agradecimentos.....	v
Dedicatória.....	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	vii
Lista de Anexos	ix
Lista de Tabelas	xii
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO II: VULNERABILIDADE EM SISTEMAS AQUÍFEROS.....	18
2.1. Evolução histórica do conceito de vulnerabilidade	18
2.2. Contaminação da água subterrânea	19
2.3. Tipos e classes de vulnerabilidade	21
2.4. Métodos de análise da vulnerabilidade em aquíferos	22
2.4.1. Método GOD	25
2.4.2. Método DRASTIC.....	26
CAPÍTULO III: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO - VALE DE NHARTANDA.....	29
3.1. Localização Geográfica	29
3.2. Enquadramento Geológico.....	30
3.3. Geomorfologia.....	32
3.4. Climatologia	33
3.5. Hidrologia	35
3.6. Hidrogeologia	38
3.7. Uso e ocupação do solo	39
CAPÍTULO IV: AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO DO VALE DE NHARTANDA	41
4.1. Metodologia	41
4.1.1. Estudos anteriores	42
4.1.2. Trabalhos de Campo.....	42
4.1.3. Geo/tecnologias.....	46
4.2. Recolha e análises dos pontos de água.....	46
4.3. Avaliação espacial da qualidade da água do Vale de Nhartanda	48

4.3.1. Parâmetros físico-químicos e organoléticos.....	49
4.3.2. Parâmetros biológicos.....	64
4.4. Vulnerabilidade do sistema aquífero do Vale de Nhartanda.....	67
4.4.1. Método GOD	67
4.4.2. Método DRASTIC	68
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	73
Bibliografia	77
Anexos	82

Agradecimentos

A concretização da presente dissertação, contou com o apoio direto e/ou indireto de múltiplos indivíduos e diversas instituições às quais estou profundamente grato. Assim, para não correr o risco de injustamente não mencionar algum dos contributos quero deixar expresso os meus mais sinceros agradecimentos:

- A minha orientadora Prof. Dr^a, Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes e ao meu co-orientador Prof. Dr. Elónio Muiuane, pelas oportunidades, contribuições, incentivos e orientações em tornar possível este trabalho;
- Aos meus familiares pelo carinho que sempre me prestaram ao longo de toda a minha vida, em especial "minha filha Máriolina" e meus filhos Kleyton e Heynz pela paciência, coragem e força por eles demonstrada durante a minha ausência;
- A minha esposa por ter estado sempre ao meu lado, pela sua paciência, compreensão e pela ajuda prestada durante minha caminhada académica;
- Aos meus professores do mestrado e ao pessoal técnico do DCT – UMinho, pelos ensinamentos, incentivos por eles transmitidos;
- A todos os amigos, colegas, conhecidos (e também aos desconhecidos) que, por algum motivo, ou sem motivo algum, sempre apoiam meus passos e confiam em minha capacidade profissional e académica;

Os agradecimentos são igualmente extensivos a várias instituições pela cedência de dados imprescindíveis e autorização do estudo em causa. Como tal agradeço:

- Ao projecto HEST e a Universidade Pedagógica de Moçambique, em especial ao Ex - Reitor, Prof. Dr. Rogério Uthui pelo fomento desta pesquisa através do financiamento e autorização por via da bolsa de estudos respetivamente;
- A FIPAG, pela disponibilização de dados e permitir a realização de análises laboratoriais em suas instalações. A Ara-Zambeze e seus funcionários sempre prestáveis, pela autorização concedida e pelas informações e instrumentos/materiais por eles fornecidos; Ao INAM – Tete, pela cedência de dados meteorológicos imprescindíveis para a realização desta dissertação;

Enfim, quero estender o meu profundo agradecimento, a todos àqueles que, de um modo ou de outro, tornaram possível a realização da presente pesquisa.

À todos Ndatenda zvikuru

Dedicatória

Aos meus pais João Paulino Bande (*In Memoriam*) e Ernestina Glória da Conceição, a minha esposa Anacrista, aos meus filhos Kleyton e Heynz e meus irmãos Cremilda, Alex e Edson pela imensa paciência e contribuição por eles demonstrada nesta grande jornada acadêmica.

Lista de Abreviaturas e Siglas

ARA – Zambeze: Administração Regional das Águas do Zambeze;

AVI: Índice de Vulnerabilidade do Aquífero;

BR: Boletim da República;

CIT: Zona de Convergência Intertropical;

CNA: Conselho Nacional da Água;

DNA: Direção Nacional de Água;

DPOPHRH: Direção Provincial de Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos;

DRASTIC: Profundidade da Água – Recarga – Meio Aquífero – Solo – Topografia – Impacto da Zona Vadosa – Condutividade Hidráulica;

E-Coli: *Escherichia coli*;

Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

EPA: *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental);

EPIK: (E) Carsificação superficial – (P) Capa protetora – (I) condição de infiltração e – (K) Rede Cársica;

EPPNA: Equipa do Projeto do Plano Nacional da Água;

ETAR: Estação de Tratamento de Águas Residuais;

EUA: Estados Unidos da América;

FIPAG: Fundo de Investimento e Património do Abastecimento de Água;

FUNASA: Fundação Nacional de Saúde;

GOD: Grau de confinamento hidráulico da água subterrânea – Ocorrência de estratos geológicos e grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinantes – Profundidade do nível de água subterrânea;

GPS: Sistema de Posicionamento Geográfico;

HCB: Hidroelétrica de Cahora Bassa;

INAM: Instituto Nacional de Meteorologia;

IRMSA: Institute Of Risk Management South Africa;

MAIA: Método de Avaliação Intrínseca de Aquíferos;

MASA: Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar;

MISAU: Ministério de Saúde;

N.D: Nível Dinâmico;

N.E: Nível Estático;

NTU: Unidade de Turvação Nefelométrica;

OMS/WHO: Organização Mundial de Saúde / World Health Organization;

PIL: Profuro Internacional Limitada;

SINTACS: **(S)** profundidade da água, **(I)** infiltração, **(N)** seção subsaturada, **(T)** tipo de solo, **(A)** características do aquífero, **(C)**, condutividade hidráulica e, **(X)** declive topográfico;

SWRPC: Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission.

Lista de Anexos

Anexo 2.1	Classes de Vulnerabilidade EPPNA, IS e BÓS	83
Anexo 2.2	Métodos de avaliação da vulnerabilidade	83
Anexo 2.3	Índices dos fatores DRASTIC	85
Anexo 3.1	Recarga do Vale de Nhartanda e Descargas de águas residuais	87
Anexo 3.2	Interdição de construção	87
Anexo 3.3	Atividades ao longo do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes	88
Anexo 4.1	Sonda elétrica	90
Anexo 4.2	Multiparamétrico HANNA	90
Anexo 4.3	Malas térmicas com amostras	90
Anexo 4.4a)	Multiparâmetro portátil Hach	90
Anexo 4.4b)	Espectrofotômetro HANNA	90
Anexo 4.5	Formação Geológica dos Furos (Média)	91

Lista de Figuras

Figura 2.1	Critérios para a escolha dos métodos de vulnerabilidade	25
Figura 2.2	Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero	26
Figura 3.1a	Localização de Moçambique na África Austral	29
Figura 3.1b	Vale de Nhartanda na Cidade de Tete	29
Figura 3.1c	Vale de Nhartanda	29
Figura 3.2	Carta geológica do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes	31
Figura 3.3	Perfil de Elevação do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes	32
Figura 3.4	Topografia do Vale de Nhartanda	33
Figura 3.5	Diagrama termopluviométrico da Cidade de Tete	34
Figura 3.6	Diagrama termopluviométrico da Cidade de Tete	35
Figura 3.7	Mapa da bacia hidrográfica do rio Zambeze	36
Figura 3.8	Mapa de Subdivisão do Baixo Zambe	37
Figura 3.9	Mapa hidrogeológico do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes	39
Figura 3.10	Ocupação do solo do Vale de Nhartanda	40
Figura 4.1	Etapas do trabalho realizado	41
Figura 4.2	Cadastro dos pontos de água e medição dos níveis freáticos	43
Figura 4.3	Processo de recolha, acondicionamento e transporte das amostras até ao laboratório.	44
Figura 4.4	Procedimentos laboratoriais para a análise química e biológica da água	45
Figura 4.5	Pontos de amostragem de água e potenciais fontes de contaminação	48
Figura 4.6	Temperatura da água do aquífero do Vale de Nhartanda	52
Figura 4.7	Turvação da água de furos do aquífero de Nhartanda	53
Figura 4.8	Turvação da água de poços do aquífero de Nhartanda	53

Figura 4.9	Valores médios de CE e TDS das águas do sistema aquífero de Nhartanda	54
Figura 4.10	Variação da alcalinidade das águas do Vale de Nhartanda	57
Figura 4.11	Variação da dureza das águas do Vale de Nhartanda	58
Figura 4.12	Variação da salinidade média anual das águas dos furos do Vale de Nhartanda	59
Figura 4.13	Variação da salinidade média das águas dos poços do Vale de Nhartanda	60
Figura 4.14	Variação dos teores de cloretos e cálcio das águas de furos do Vale de Nhartanda	61
Figura 4.15	Variação dos teores de cloretos e cálcio das águas de poços do Vale de Nhartanda	61
Figura 4.16	Variação dos teores de Ferro Total e Manganês nas águas dos furos do Vale de Nhartanda	62
Figura 4.17	Variação dos teores de Ferro Total e Manganês nas águas dos poços do Vale de Nhartanda	62
Figura 4.18	Variação das espécies essenciais de azoto na água dos furos do Vale de Nhartanda	63
Figura 4.19	Variação das espécies essenciais de azoto na água dos poços do Vale de Nhartanda	64
Figura 4.20	Variação da <i>E-Coli</i> , Coliformes totais e Contagem bacteriana na água dos furos do Vale de Nhartanda.	65
Figura 4.21	Variação da <i>E-Coli</i> , Coliformes totais e Contagem bacteriana na água dos poços do Vale de Nhartanda.	65
Figura 4.22	Recarga anual do Vale de Nhartanda	69

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Principais causas e contaminantes da água subterrânea	19
Tabela 2.2	Fatores hidrogeológicos na vulnerabilidade de um aquífero	20
Tabela 2.3	Classes de vulnerabilidade em aquíferos	21
Tabela 2.4	Principais métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos	22
Tabela 2.5	Ponderação dos parâmetros do método DRASTIC	27
Tabela 2.6	Classe de vulnerabilidade DRASTIC	27
Tabela 3.1	Sub-estações do ano da Cidade de Tete	34
Tabela 3.2	Características da bacia hidrográfica do Zambeze	36
Tabela 4.1	Instituições e informação cedida	41
Tabela 4.2	Alguns trabalhos anteriores sobre o Vale de Nhartanda	42
Tabela 4.3	Pontos de água cadastrados	47
Tabela 4.4	Principais sais e gases que conferem sabor à água subterrânea	50
Tabela 4.5	Classificação da água segundo o teor em TDS (mg/L)	55
Tabela 4.6	Principais substâncias que contribuem para a alcalinidade de uma água	57
Tabela 4.7	Classificação da dureza da água	58
Tabela 4.8	Índice de vulnerabilidade GOD para os poços do Vale de Nhartanda	67
Tabela 4.9	Profundidade do nível freático nos furos do Vale de Nhartanda	68
Tabela 4.10	Índice de vulnerabilidade DRASTIC para os furos do Vale de Nhartanda	72

Resumo

A água constitui um recurso essencial e indispensável, pelo que, tem de ocorrer em quantidade e qualidade adequadas às necessidades dos seres vivos. Contudo, a disponibilidade quantitativa e qualitativa deste recurso nem sempre contempla as exigências locais. Geralmente, a qualidade da água subterrânea é superior à da água superficial e, muitas vezes, considera-se como invulnerável. É neste contexto que surge o presente trabalho que tem por principal objetivo o estudo da Vulnerabilidade do Sistema Aquífero no Vale de Nhartanda, Cidade de Tete, Moçambique. O Vale de Nhartanda corresponde a uma planície de inundação, com uma área de aproximadamente 6.76 km² e altitudes entre 125m-130m, onde é feita a captação da água para abastecimento público da Cidade de Tete "antiga". No Vale de Nhartanda ocorrem diversas actividades de agro-pecuária tradicional cuja rega é garantida pela água dos poços artesais e águas residuais domésticas provenientes das áreas adjacentes do Vale. Estas actividades, bem como outras que ocorrem na área podem comprometer a qualidade da água superficial e subterrânea. Na avaliação da qualidade da água foram realizadas determinações "*in situ*" e análises laboratoriais. Posteriormente, foram determinados os índices de vulnerabilidade do sistema aquífero, mediante a aplicação dos métodos GOD para os poços e DRASTIC para os furos. Os índices de vulnerabilidade obtidos para o aquífero livre do Vale de Nhartanda indicam uma vulnerabilidade, alta e muito alta para esta área, com qualquer um dos métodos aplicados. De referir, a possibilidade de na estação quente e húmida, o índice de vulnerabilidade atingir o seu nível extremo mais elevado, sendo o aquífero alcançado de forma relativamente rápida por organismos e substâncias nocivas. Neste sentido, um conjunto de ações e medidas de proteção especial é necessário aplicar nesta região, protegendo a água deste sistema aquífero de forma a não inviabilizar o abastecimento de água potável para consumo humano. Estas ações passam necessariamente pela consciencialização sócio-ambiental das autoridades locais e da população, com a aplicação de medidas de fiscalização adequadas.

Palavras-chave: Água subterrânea, Vulnerabilidade, GOD, DRASTIC, Vale de Nhartanda, Moçambique.

Abstract

Water is an essential and indispensable resource and must occur in appropriate quantity and quality. However, sometimes quantitative and qualitative water availability is not adequate to local requirements. Generally, groundwater has a better quality than surface water and is less vulnerable. The main objective of this research is the vulnerability assessment of the Aquifer System in the Nhartanda Valley, City of Tete, Mozambique. The floodplain area has approximately 6.76 km² and an altitude ranging between 125m-130m. The water is collected for public supply in the "ancient" city of Tete. In addition to this activity, there is a traditional agro-livestock farm in the Nhartanda Valley whose irrigation is guaranteed by artesian wells and domestic wastewater from the adjacent areas. These and other activities could affect groundwater quality. In situ water determinations and laboratory analysis were performed to assess water quality in the study area. Groundwater vulnerability was determined through the application of GOD index vulnerability for the wells and DRASTIC index for the holes. The vulnerability indexes of the Nhartanda Valley aquifer vary from moderate, high to very high. It is believed that during hot and humid seasons, the vulnerability index can reach to extreme levels, being reached relatively quickly by harmful organisms and substances. According this, a specific set of actions and measures will be necessary for Nhartanda Valley aquifer which main function is to provide water for human consumption. These actions necessarily must involve social and environmental awareness of civil society and local and regional population.

Key words: Groundwater, Vulnerability, GOD and DRASTIC indexes, Nhartanda Valley, Mozambique.

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A água constitui um recurso crucial e indispensável à existência de vida no planeta Terra. Ela apresenta um evidente valor ecológico e tem vindo a ser um fator determinante para o desenvolvimento de muitas atividades humanas, nomeadamente a distribuição geográfica mundial das civilizações, ao longo dos anos.

A água ocupa cerca de 2/3 da superfície da Terra, com maior concentração no hemisfério sul (70%), daí a designação de hemisfério aquático. Contudo, do volume total de água na Terra, cerca de 97% é água salgada e os restantes 3% correspondem a água doce. Do volume total de água doce, 68.7% ocorre sob a forma sólida, em calotes polares e glaciário, 30.1% em reservatórios subterrâneos, 0.3% água superficial e 0.9% em outras formas (Atmosfera, biosfera). Da água superficial, 2% concentram-se em rios, 11% em Pantanos e 87% em Lagos (WATERLOO *et al.*, 2016).

Grande parte da água consumida pelos seres vivos e principalmente pelos seres humanos provém de reservatórios de água superficial (lagos, pântanos e rios) e subterrânea (aquicludo, aquífero e aquíferos). Este último, por se encontrar mais protegido natural e antropogenicamente, da acção de poluentes e/ou contaminantes do que a água superficial considera-se menos vulnerável à contaminação. Apesar da capacidade protetora (filtração e autodepuração) das camadas superiores do solo, os reservatórios de água subterrânea estão constantemente sujeitos e agredidos pela ação humana.

Neste sentido, e a partir desta consciência, é possível melhor compreender a importância da água para a vida no planeta Terra e a necessidade dos recursos hídricos serem devidamente preservados, qualitativa e quantitativamente.

Atualmente, a água subterrânea, à semelhança de outros recursos naturais, está exposta a diferentes agressões e apresenta elevada vulnerabilidade devido à má utilização e gestão pelo Homem. Um exemplo destas agressões é a que ocorre no sistema aquífero do Vale de Nhartanda, na Cidade de Tete – Moçambique, onde devido à inexistência de Estações de Tratamento de Águas Residuais, associada à prática de atividades agropecuárias e fraco saneamento básico, os resíduos são depositados irregularmente no vale e áreas adjacentes, bem como, na sua principal fonte de recarga – o rio Zambeze. Esta situação aumenta o índice de vulnerabilidade do aquífero e contribui para a deterioração da qualidade da água da principal fonte de captação de água para abastecimento da Cidade de Tete "antiga".

Dentro deste contexto, a determinação da vulnerabilidade e da qualidade da água de um sistema aquífero pode ser obtida através da aplicação dos métodos de vulnerabilidade - GOD e DRASTIC - cuja representação espacial sob a forma de mapas permitirá aos órgãos gestores, uma melhor avaliação das propostas de desenvolvimento, aliada ao controle da poluição e monitorização da qualidade da água subterrânea.

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a qualidade de água e o índice de vulnerabilidade à contaminação no aquífero livre do Vale de Nhartanda. Para tal, foram determinados os principais parâmetros físico-químicos, organolépticos e biológicos da água, bem como, as principais atividades antrópicas desenvolvidas na planície de inundação e áreas adjacentes, que constituem potenciais fontes de contaminação. Com estas informações será possível indicar algumas medidas preventivas de controle do uso e qualidade da água subterrânea, contribuindo deste modo para a melhor proteção e uma boa gestão dos recursos hídricos locais, e consequentemente, para o bem estar da população.

É da responsabilidade do Governo Central e Local e das empresas de serviços de água, garantir uma gestão racional e sustentada deste recurso, passando pela educação da população, no sentido de cada um assumir e se comprometer com o uso eficiente e eficaz da água e proteção dos aquíferos, reduzindo deste modo o "*Stress* hídrico".

A presente dissertação encontra-se dividida em duas partes, a primeira relativa ao enquadramento geral do tema de investigação e a segunda destinada ao caso de estudo e aos vários aspectos que o caracterizam, focando a qualidade da água e o índice de vulnerabilidade do sistema aquífero do Vale de Nhartanda. Assim, o trabalho que se segue está organizado em 5 capítulos:

No capítulo I é apresentado, de forma sumária o tema geral em estudo, delimitação e justificação, indicando a sua relevância, bem como, os principais problemas e objectivos do mesmo.

O capítulo II refere a fundamentação teórica sobre a vulnerabilidade de um sistema aquífero e risco de contaminação. São referidos aspetos relacionados com o conceito de vulnerabilidade, deterioração da qualidade da água subterrânea, tipos, classes e métodos de análise da vulnerabilidade em sistemas aquíferos. Após descritas diversas metodologias existentes, foram seleccionados os dois métodos de vulnerabilidade - GOD e DRASTIC - e aplicados no sistema aquífero do Vale de Nhartanda.

O capítulo III é dedicado à caracterização geral da área em estudo - Vale de Nhartanda, sendo apresentada a localização geográfica, caracterização geológica, geomorfológica, climática, hidrológica e hidrogeológica, bem como, o uso e ocupação do solo. Neste capítulo, os trabalhos da Ara-Zambeze, We Consult, FIPAG – Tete e INAM – Tete desempenharam um papel preponderante, coadjuvando os trabalhos de campo realizados ao longo do trabalho.

No capítulo IV são abordados alguns aspetos relacionados com a qualidade da água e a avaliação da vulnerabilidade do sistema aquífero do Vale de Nhartanda. Os resultados apresentados resultam da compilação de trabalhos anteriores, complementados com os resultados do trabalho de campo e laboratorial realizados e aplicação de geotecnologias adequadas.

O Capítulo V apresenta uma síntese do trabalho de investigação realizado, acompanhada das considerações finais. Os principais resultados são interpretados e apresentam-se algumas sugestões com a finalidade de proteger e monitorizar a principal fonte de captação de água subterrânea na cidade de Tete - o sistema aquífero do Vale de Nhartanda.

CAPÍTULO II: VULNERABILIDADE EM SISTEMAS AQUÍFEROS

2.1. Evolução histórica do conceito de vulnerabilidade

Embora controverso, o conceito de vulnerabilidade de aquíferos foi introduzido na década de 60, altura em que foi desenvolvida a abordagem concetual para a proteção de recursos hídricos subterrâneos, baseada em monitorização, mapeamento, modelação e tecnologias de remediação (KOVALEVSKY *et al.*, 2004). Segundo HIRATA (2001), o termo foi inicialmente utilizado por Le Grand em 1964, nos EUA, distanciando-se de VRBA & ZAPOROZEC (1994) que afirmam que foi no final da década de 60. Para FOSTER *et al.*, (2006), o conceito de vulnerabilidade começou a ser usado a partir da década de 1970, na França por Albinet e Margat.

Desde então, o conceito de vulnerabilidade passou a ter várias definições:

- A Vulnerabilidade de um aquífero é definida como a suscetibilidade da qualidade da água subterrânea face à exposição a uma carga de contaminante, determinada pelas características intrínsecas do aquífero (LOBO, 1999);
- A vulnerabilidade de um aquífero à contaminação pode ser referida como o conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina a sua suscetibilidade face aos efeitos adversos da carga contaminante, aplicada na superfície. Será condicionada pela acessibilidade hidráulica da zona não saturada à exposição de contaminantes (adveção de contaminantes) e capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, como resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação) (FOSTER, 1987).
- A vulnerabilidade à poluição pode ser definida como a capacidade dos poluentes atingirem as águas subterrâneas, depois de introduzidos na superfície do solo, acima do aquífero. Neste caso, é considerada preferencialmente a ação dos poluentes (CARBONELL, 1993).
- A vulnerabilidade é definida como a probabilidade da água subterrânea de um aquífero atingir níveis elevados de contaminação, resultante das atividades desenvolvidas à superfície do solo (FOSTER & HIRATA, 1988; ADAMS & FOSTER, 1992).

Dependendo das características edáficas (ocupação da superfície do solo, textura, estrutura, humidade, presença de canais biológicos), litológicas (existência de fendas e fraturas) e da carga hidráulica, a água atravessa a superfície do solo e pode atingir o sistema aquífero. Neste contexto, as atividades desenvolvidas na superfície serão repercutidas na água subterrânea através da propagação de substâncias, podendo alterar a sua qualidade. No entanto, outros

conceitos estão intimamente associados à vulnerabilidade dos aquíferos, e por vezes, são usados de forma inadequada como sinónimo. De entre estes conceitos podem ser referidos:

- Potencial de contaminação: refere-se à suscetibilidade da água subterrânea face à contaminação por um contaminante específico ou uma fonte específica de contaminação (VRBA & ZAPOROZEC, 1994).
- Suscetibilidade das águas subterrâneas: designa a incapacidade de um aquífero para resistir aos efeitos adversos de uma carga contaminante (VRBA & ZAPOROZEC, 1994).
- Risco de poluição: é a ameaça representada por uma substância, para a saúde humana, devido à sua infiltração na água subterrânea, a partir de uma fonte específica de contaminação (FOSTER *et al.*, s/d). Este risco depende tanto da vulnerabilidade do aquífero, bem como, da existência de poluentes que entram a partir da superfície (KIRSCH, 2006).

2.2. Contaminação da água subterrânea

Apesar de estarem menos expostas aos contaminantes e mais protegidas do que as águas superficiais, as águas subterrâneas podem ser poluídas e/ou contaminadas sempre que os poluentes e/ou contaminantes atravessam a zona não saturada do solo ou zona vadosa.

Existem várias causas possíveis para a deterioração da qualidade da água de um aquífero, sendo as origens mais comuns descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Principais causas e contaminantes da água subterrânea (FOSTER *et al.*, 2006).

	Principal causa	Contaminantes principais
Contaminação do aquífero	Proteção inadequada de aquíferos vulneráveis face a emissões e lixiviados provenientes de atividades urbano-industriais e intensificação de atividades agrícolas.	Microorganismos patogénicos, nitrato ou amónia, cloreto, sulfato, boro, arsénio, metais pesados, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, certos pesticidas.
Contaminação na captação	Poço ou captação de construção inadequada, permitindo a infiltração direta de água superficial ou água subterrânea contaminada.	Principalmente microorganismos patogénicos.

Intrusão salina	Água subterrânea salina, por vezes contaminada, que, por excesso de extração, é infiltrada no aquífero de água doce.	Principalmente cloreto de sódio, mas pode incluir também contaminantes persistentes produzidos por atividades humanas.
Contaminação natural	Evolução química da água subterrânea, com a dissolução de minerais, podendo ser agravada pelas atividades humanas e/ou extração excessiva.	Principalmente ião fluoreto e ferro solúvel, por vezes, sulfato de magnésio, arsénio, manganês, selénio, crómio e outras espécies inorgânicas.

De acordo com os principais problemas que podem interferir na qualidade da água, bem como, as suas causas, é importante considerar que toda a água subterrânea de origem meteórica é passível de ser poluída e/ou contaminada e de que não existe nenhum aquífero invulnerável, sendo a contaminação controlada principalmente por fatores hidrogeológicos (Tab. 2.2).

Tabela 2.2: Fatores hidrogeológicos na vulnerabilidade de um aquífero (FOSTER *et al.*, 2006).

Vulnerabilidade		Dados Hidrogeológicos	
por		Necessários	Normalmente Disponíveis
Inacessibilidade Hidráulica		<ul style="list-style-type: none"> • Grau de confinamento do aquífero; • Profundidade do nível freático ou da água subterrânea; • Condutividade hidráulica vertical e teor de humidade da zona não saturada ou camada confinante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de confinamento da água subterrânea; • Profundidade até ao nível freático ou ao teto do aquífero confinado.
	Capacidade de Atenuação	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante; • Mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grau de consolidação/fissuração dos estratos; • Caracterização litológica dos estratos.

2.3. Tipos e classes de vulnerabilidade

A vulnerabilidade pode ser distinguida em: **(i)** intrínseca ou natural: utilizada como ferramenta de auxílio às propostas de proteção das águas subterrâneas, em atividades de gestão dos recursos hídricos e de planeamento e ordenamento territorial, e que está relacionada com os fatores hidrogeológicos do meio (características do aquífero, solo e materiais geológicos), e **(ii)** específica ou integrada: definida pelos potenciais impactos resultantes do uso do solo e contaminantes associados, ou seja, refere-se ao perigo de deterioração em relação a poluentes específicos (VRBA & ZAPOROZEC, 1994).

A vulnerabilidade pode ser referida como: **(i)** Relativa, em que as unidades de um mapa de vulnerabilidade são classificadas umas em relação às outras e não possuem um valor absoluto; **(ii)** Absoluta, em que cada unidade mapeada possui um significado próprio, ou seja, cada índice de vulnerabilidade estará associado à capacidade de degradação de um contaminante ou grupo de contaminantes; **(iii)** Geral/universal, que é relativa a todas as atividades ou classes de contaminantes. Na tabela 2.3 são apresentadas as cinco classes de vulnerabilidade definidas para um aquífero.

Tabela 2.3: Classes de vulnerabilidade em aquíferos (FOSTER *et al.*, 2006).

Classe de vulnerabilidade	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes, com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.
Alta	Vulnerável a diversos contaminantes (excepto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) e em diferentes situações de contaminação.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, apenas quando continuamente lançados ou lixiviados.
Baixa	Vulnerável apenas a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando continua e amplamente lançados ou lixiviados.
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical de água subterrânea (percolação).

De salientar que as classes de vulnerabilidade variam em função do método de vulnerabilidade, sendo o número máximo no método EPPNA, com oito classes (Anexo 2.1), enquanto o método GOD tem 5 classes (Tab. 2.3) e IS e BÓS, quatro classes (Anexo 2.1).

2.4. Métodos de análise da vulnerabilidade em aquíferos

Existem vários métodos de avaliação da vulnerabilidade de um aquífero (Tab. 2.4; Anexo 2.2) que auxiliam na identificação dos principais fatores que podem promover a poluição e/ou contaminação da água subterrânea. Este tipo de análise é particularmente importante na definição de ações de preservação e manutenção das águas subterrâneas, bem como, na gestão de Instituições responsáveis pela implementação de políticas de controle e conservação da água (AUGE, 2008).

Tabela 2.4: Principais métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, Adaptado de AUGÉ (2008); ARTUSO *et al.* (2002); BÓS & THOMÉ, (2012) e FOSTER *et al.* (2006);

Método	Fatores	Autor (es)
MAIA	Profundidade água, espessura do solo, declive, capacidade específica, recarga potencial, densidade de fraturas e transmissividade do aquífero.	MAIA & CRUZ (2011)
BÓS	Profundidade água subterrânea, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, influência da zona vadosa, condutividade hidráulica e ocupação do solo.	BÓS (2007).
IS	Profundidade da água, recarga aquífera, litologia, topografia e ocupação do solo.	FRANCÉS <i>et al.</i> (2001)
EPPNA	Características litológicas e hidrogeológicas.	EPPNA (1998).
Ekv	Espessura da zona vadosa e permeabilidade da zona saturada.	AUGE (1995).
AVI	Espessura da zona vadosa acima do aquífero e condutividade hidráulica.	STEMPVO ORT <i>et al.</i>

		(1992).
SINTACS	Profundidade do nível freático, infiltração efetiva, características da zona não saturada, tipo de solo, características do aquífero, condutividade hidráulica e topografia.	CIVITA (1994).
GOD	Grau de confinamento da água subterrânea, ocorrência de estratos de cobertura e profundidade da água.	FOSTER (1987).
DRASTIC & DRASTIC PESTICIDA	Profundidade água subterrânea, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, impacte da zona vadosa e condutividade hidráulica.	ALLER <i>et al.</i> (1987).
Mapa de Vulnerabilidade do Aquífero	Características litológicas, áreas de recarga e descarga.	DUARTE (1980).
Poluição dos Aquíferos	Geologia (litologia e estrutura).	TALTASSE (1972).

Com a exceção dos métodos EPIK e $\Delta hT'$ (Anexo 2.2), todos os restantes índices de vulnerabilidade foram desenvolvidos especialmente para aquíferos detriticos livres. A escolha do método para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas numa região depende de vários fatores, entre os quais:

- **Conhecimento e divulgação da metodologia:** alguns métodos são mais conhecidos e divulgados do que outros. Na América do Norte, o DRASTIC é o mais divulgado e utilizado para qualificar a vulnerabilidade de sistemas aquíferos. Na América Latina, embora o DRASTIC seja usado, também se utiliza o método GOD. Em Espanha e Inglaterra, o GOD é bastante utilizado enquanto que nos restantes países europeus, é mais utilizado o método SINTACS (AUGE, 2008). Em África, particularmente em Moçambique, os métodos de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos são "inexistentes" e/ou pouco conhecidos e difundidos, sendo os estudos baseados principalmente em análises da qualidade de água e, conseqüentemente, bastante distantes da utilização e aplicação de métodos da vulnerabilidade.

- **Informação disponível:** a avaliação da vulnerabilidade de uma região, que normalmente termina com a sua representação cartográfica, é realizada tendo por base a

informação existente, pelo que é dificultada sempre que a quantidade de informação necessária aumenta consideravelmente. Os métodos DRASTIC e SINTACS requerem sete parâmetros, enquanto que o GOD é baseado em três e o AVI e Ekv apenas em dois. Ao diminuir o número de parâmetros, a avaliação é simplificada, mas o grau de detalhe e precisão pode ser reduzido.

- **Âmbito da avaliação:** a avaliação depende do objetivo proposto. Em trabalhos semi-regionais (escalas de 1:100 000 a 1:500 000 e 1:500000) e regionais (escala 1:500000 e inferior), cujo objetivo consiste em planejar e preservar o uso adequado dos recursos naturais, e em regiões relativamente grandes (milhares km²), alguns dos métodos descritos na Tabela 2.4 são práticos e aplicáveis, com exceção dos métodos de BÓS, MAIA, IS, SINTACS e DRASTIC. Estes últimos são particularmente utilizados em estudos semi-detalhados (escalas 1: 25000 a 1: 100000) e detalhados (escala superior a 1:25000).

- **Validação dos resultados:** a representatividade dos estudos de vulnerabilidade pode ser verificada nas áreas onde há deterioração por contaminação das águas subterrâneas. Nestes casos, a vulnerabilidade intrínseca deve ser adicionada à carga e ao tipo de contaminante, a fim de obter um mapa de risco. Portanto, para validar a representatividade dos índices de vulnerabilidade, diferentes metodologias são geralmente aplicadas aos locais afetados, de forma a verificar qual o mais apropriado, e posteriormente utilizá-lo com o objetivo de prevenir a contaminação. No entanto, e em alguns casos, nenhum dos métodos de vulnerabilidade pode ser representativo, especialmente em áreas urbanas e/ou rurais cultivadas, nas quais a profundidade da água é bastante importante. Nestes casos, por exemplo, nos locais com elevada contaminação por nitratos (NO₃), a elaboração de um conjunto de mapas de vulnerabilidade específica, é essencial. A melhor representatividade de um determinado método de vulnerabilidade em áreas não afetadas por um contaminante específico é muito difícil de estabelecer, devido, entre outros fatores, à demora com que os processos de poluição ocorrem em sistemas hidrogeológicos, particularmente nos meios com porosidade intergranular (AUGE, 2008).

No presente trabalho são abordados dois métodos distintos: o GOD e o DRASTIC cujas motivações são apresentadas na Fig. 2.1.

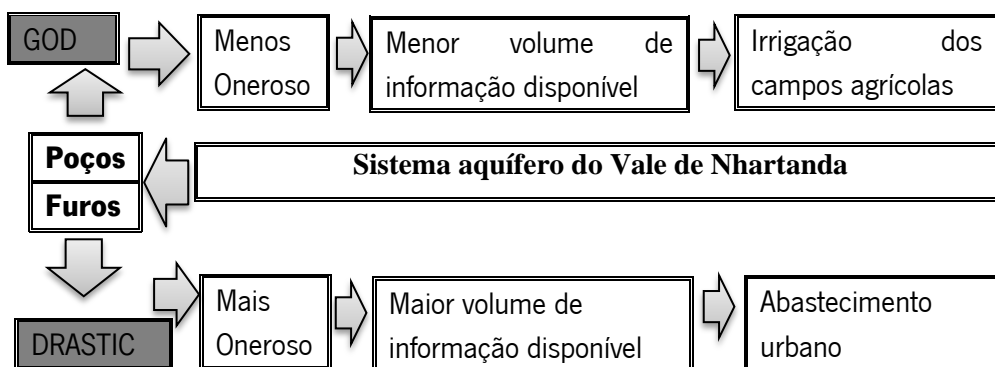


Figura 2.1: Critérios para a escolha dos métodos de vulnerabilidade.

Os objectivos para os quais foram instalados os pontos de água, associado ao grau de pormenor, volume e fiabilidade da informação é que determinam a selecção do método mais adequado a aplicar.

2.4.1. Método GOD

O método de vulnerabilidade GOD foi desenvolvido por FOSTER (1987) e modificado por FOSTER & HIRATA (1988), tendo sido amplamente testado na América Latina e no Caribe, durante a década de 1990, e aperfeiçoado ao longo dos anos. Este método permite uma avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação, em áreas com reduzida disponibilidade de informação hidrodinâmica de poços (FOSTER *et al.*, 2006).

Para determinar a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação, com aplicação do método GOD, devem ser considerados dois fatores hidrogeológicos como indicado na Figura 2.2. Segundo FOSTER *et al.* (2006), esta metodologia proposta para avaliar a vulnerabilidade do aquífero é bastante simples e de fácil aplicação, pois implica a avaliação de apenas três parâmetros:

- **Grau de confinamento da água subterrânea (G):** identifica o tipo de confinamento de água subterrânea, com a indexação do parâmetro na escala de 0,0–1,0;
- **Ocorrência de estratos de cobertura (O):** especifica os estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em grau de consolidação e tipo de litologia, com pontuação, na escala de 0,4–1,0;
- **Distância ao nível freático ou ao teto do aquífero confinado (D):** classifica a captação conforme a distância ao nível freático, realizada através do nível estático do poço avaliado, com posterior classificação na escala de 0,6–1,0.

Os três parâmetros variam entre 0-1.0 e são apresentados na Fig. 2.2.

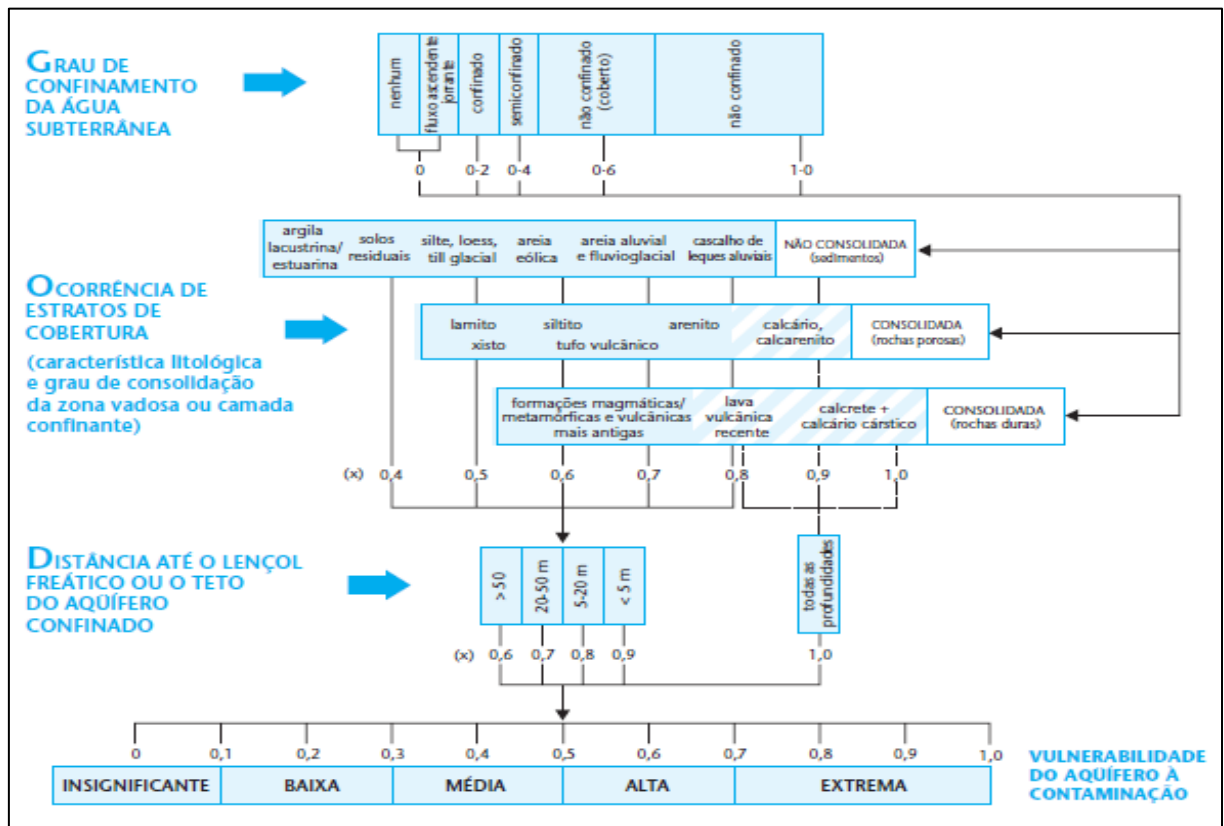


Figura 2.2: Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero (FOSTER *et al.*, 2006).

Todos os parâmetros possuem o mesmo nível de importância, pelo que depois de contabilizados, multiplica-se o valor dessas pontuações, e o resultado final representará a vulnerabilidade do aquífero (V), ou seja, $V = G \times O \times D$.

2.4.2. Método DRASTIC

Este método foi desenvolvido por ALLER *et al.*, (1987) para a EPA, a fim de avaliar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, em uma área mínima avaliável de 0,4 km², partindo dos seguintes pressupostos:

- O contaminante é introduzido na superfície do terreno;
- O contaminante é transportado verticalmente até ao aquífero, por infiltração;
- O contaminante possui a mesma mobilidade que a água;

O método consiste na soma ponderada de sete parâmetros, em que a cada um deles é atribuído um índice (r), que varia de 1 a 10 (Anexo 2.3), em função das características locais e do comportamento das variáveis consideradas no acrónimo DRASTIC (Tabela 2.5; ALLER *et al.*, 1987).

Tabela 2.5: Ponderação dos parâmetros do método DRASTIC (FOSTER *et al.*, 2006).

Acrônimo	Parâmetros	Ponderação (p)
D	Profundidade da água subterrânea	05
R	Recarga aquífera	04
A	Litologia do aquífero	03
S	Tipo de solo	02
T	Topografia	01
I	Litologia da zona vadosa	05
C	Condutividade hidráulica do aquífero	03

De salientar que o índice DRASTIC contém três proporções significativas: (i) **a ponderação** determina a importância relativa de cada parâmetros em relação aos outros (Tabela 2.5); (ii) **os intervalos** dividem os parâmetros do DRASTIC baseando-se no potencial de poluição e são representados graficamente para observar a linearidade e a não linearidade do fator; (iii) **o índice** de vulnerabilidade (que varia de 23 a 226) permite avaliar o significado relativo de cada intervalo em relação ao potencial de poluição (Tabela 2.6) ALLER *et al.* (1987). Assim, quanto maior for o índice DRASTIC, maior será o potencial de poluição.

Tabela 2.6: Classe de vulnerabilidade DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987).

Intervalo de valores	Vulnerabilidade
<100	Insignificante
101 – 119	Muito baixa
120 – 139	Baixa
140 – 159	Moderada
160 – 179	Alta
180 – 199	Muito alta
> 200	Extrema

Os fatores relativos aos parâmetros **D, R, S, T e C** são atribuídos a um valor por intervalo. Aos parâmetros **A** e **I** é atribuído uma classificação variável (Anexo 2.3). A classificação variável permite que o usuário escolha um valor típico ou ajuste o valor, com base num conhecimento

mais específico. A classificação é a mesma para o índice DRASTIC e DRASTIC Pesticida modificado (ALLER *et al.*, 1987).

Cada parâmetro é ponderado e multiplicado pela ponderação (p), que varia de 1 (mínimo) a 5 (máximo), sendo que ao parâmetro mais significativo da área é atribuído o valor 5 (Tabela 2.5). Estes fatores, denominados fatores de ponderação DRASTIC, são relacionados entre si através de uma equação simples, aplicada a cada unidade geográfica de trabalho:

$$\text{DRASTIC} = Dp.Dc + Rp.Rc + Ap.Ac + Sp.Sc + Tp.Tc + Ip.Ic + Cp.Cc$$

Em que:

- Dp, Rp, Ap, Sp, Tp, Ip, Cp = ponderação dos parâmetros DRASTIC;
- Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic, Cc = respectivos intervalos de ocorrência.

Pelo facto do método DRASTIC possuir muitos parâmetros diretos e indiretos utilizados na sua determinação torna a sua aplicação mais onerosa e complexa.

Importa referir que existem duas variantes do método DRASTIC, a classificação descrita anteriormente e outra criada especificamente para áreas com utilização de pesticidas agrícolas, o método DRASTIC pesticida (ALLER *et al.*, 1987).

O DRASTIC Pesticida distingue-se do DRASTIC na atribuição de ponderações que variam entre 2 a 5 (Anexo 2.3) relativas aos sete fatores DRASTIC. Todas as outras componentes destes dois índices são idênticas. Os intervalos, os índices e as instruções de uso são as mesmas (ALLER *et al.*, 1987). Em ambos os índices, os valores finais são proporcionais à vulnerabilidade presente.

CAPÍTULO III: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO - VALE DE NHARTANDA

3.1. Localização Geográfica

O Vale de Nhartanda situa-se na África Austral, mais concretamente no Centro de Moçambique (Fig. 3.1a), na parte meridional da Cidade de Tete (Fig.3.1b), Província de Tete.

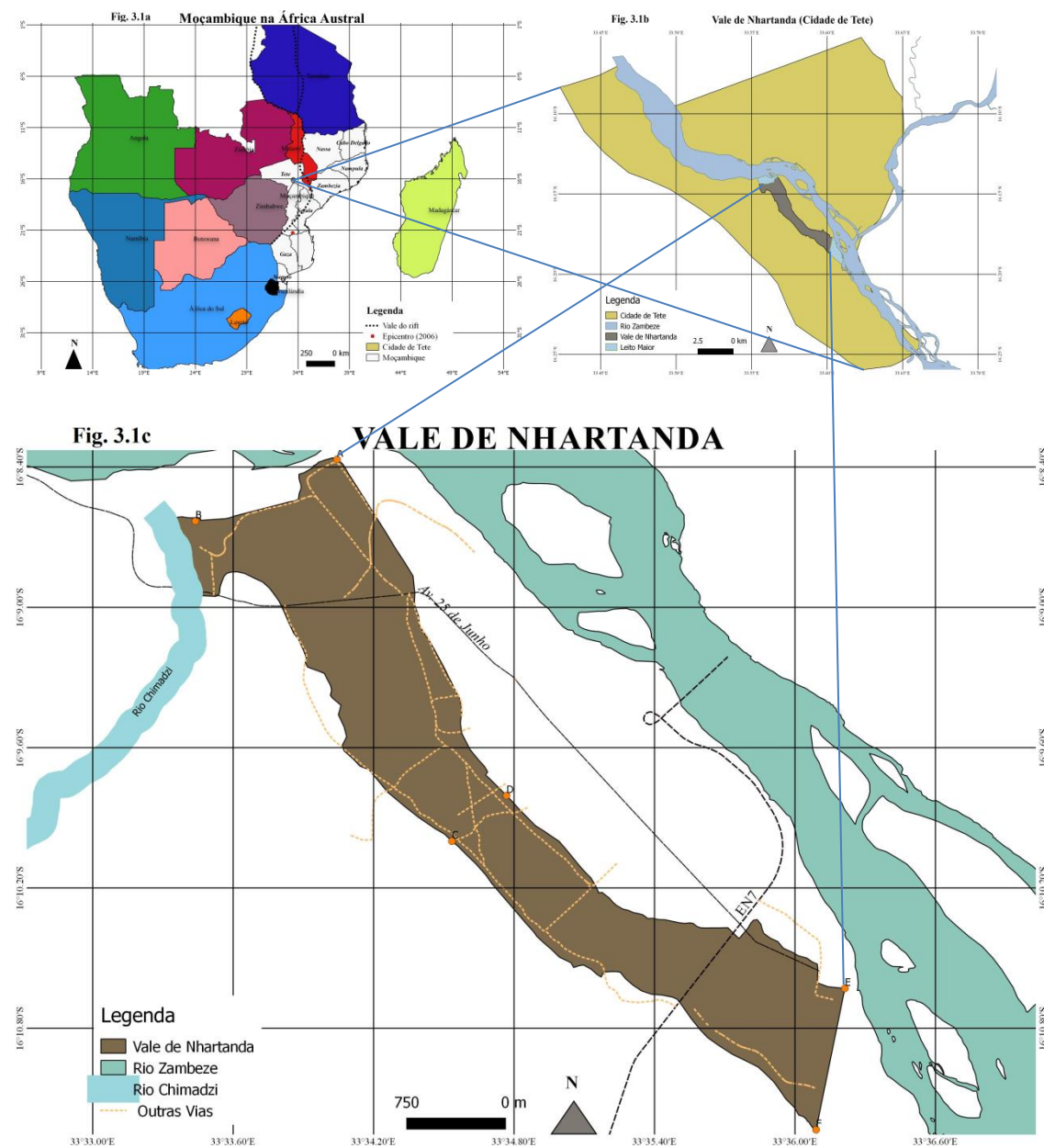


Figura 3.1: Enquadramento geográfico do Vale de Nhartanda.

O Vale de Nhartanda ocupa uma área de 6.76 km², correspondente a 2.2% da superfície da Cidade de Tete, que é aproximadamente de 314 km².

Trata-se de uma planície fluvial do rio Zambeze, com orientação NW/SE, situada na confluência de 5 povoações: Filipe Samuel Magaia, Josina Machel, Francisco Manyanga, Sansão Muthemba e Samora Machel. É atravessado pela Av. 25 de Junho na parte Setentrional (paralelos: 16° 8'56.42"S, meridianos: 33°34'21.30"E), pela EN7 na região Meridional (16°10'21.93"S, 33°35'45.38"E), e diversas vias secundárias em terra batida (Fig. 3.1c).

O comprimento máximo do vale (secção A-F; Fig. 3.1c), medido em linha recta desde montante até jusante é de 6.45 km (coordenadas: 16°8'22.04"S/33°34'2.61"E – 16°11'14.00"S/33°36'5.41"E; Fig. 3.1c).

A largura máxima (secção A-B; Fig. 3.1c), medida entre as coordenadas 16° 8'22.04"S/33°34'2.61"E e 16° 8'37.87"S/33°33'26.32"E é cerca de 1.4 km. As elevadas dimensões deste vale estão associadas à ação erosiva provocada pelas enxurradas do rio Chimadzi e pelo elevado caudal do Rio Zambeze, na época mais chuvosa.

A largura mínima, medida na área central entre as coordenadas 16° 9'59.99"S/33°34'32.06"E e 16° 9'48.29"S/33°34'46.06"E, é de 0.55km (secção D-C; Fig. 3.1c). Esta constrição estende-se ao longo de aproximadamente a 2 km de comprimento, na direção NW/SE, causada pelas diferenças topográficas e litológicas entre as áreas adjacentes. Na zona sudeste (secção E-F; Fig. 3.1c), entre as coordenadas 16°10'37.74"S/33°36'12.79"E e 16°11'14.00"S/33°36'5.41"E, o vale volta a alargar e apresenta uma largura de aproximadamente 1.2 km.

3.2. Enquadramento Geológico

Geologicamente, Moçambique apresenta duas grandes unidades geológicas: (i) **Pré-câmbrica**, subdividida em *inferior* ou *arcáica* (representada pelo cratão rodesiano), com 200 Ma, constituída por rochas metamórficas de protólitos magmáticos e sedimentares e *Superior* (conhecido por cinturão de Moçambique), constituída por rochas com cerca de 500 Ma, individualizando-se em 3 províncias geológicas: Moçambique, Niassa e Médio-Zambeze; e (ii) **Fanerozóica** constituída essencialmente por rochas sedimentares, com idade entre 300 - 700 Ma, subdividida em: Karroo, Jurássico, Cretácico, Terceário e Quaternário (MUCHANGOS, 1999).

O Vale de Nhartanda é constituído por formações sedimentares Fanerozóicas do Médio Zambeze, pertencentes ao período mais recente da Era Cenozóica – o Quaternário (como ilustra a Fig. 3.2).

As unidades litológicas estão representadas maioritariamente por rochas sedimentares, com grés de cor cinzenta-acastanhada, constituído por diferentes componentes incluindo argila, silte, cascalho e minerais de quartzo, calcite, microclina, caolinite, albite, anortite e moscovite.

Há indícios da ocorrência de carvão mineral, uma vez que ocorre em abundância no subsolo de grande parte da Cidade e Província de Tete.

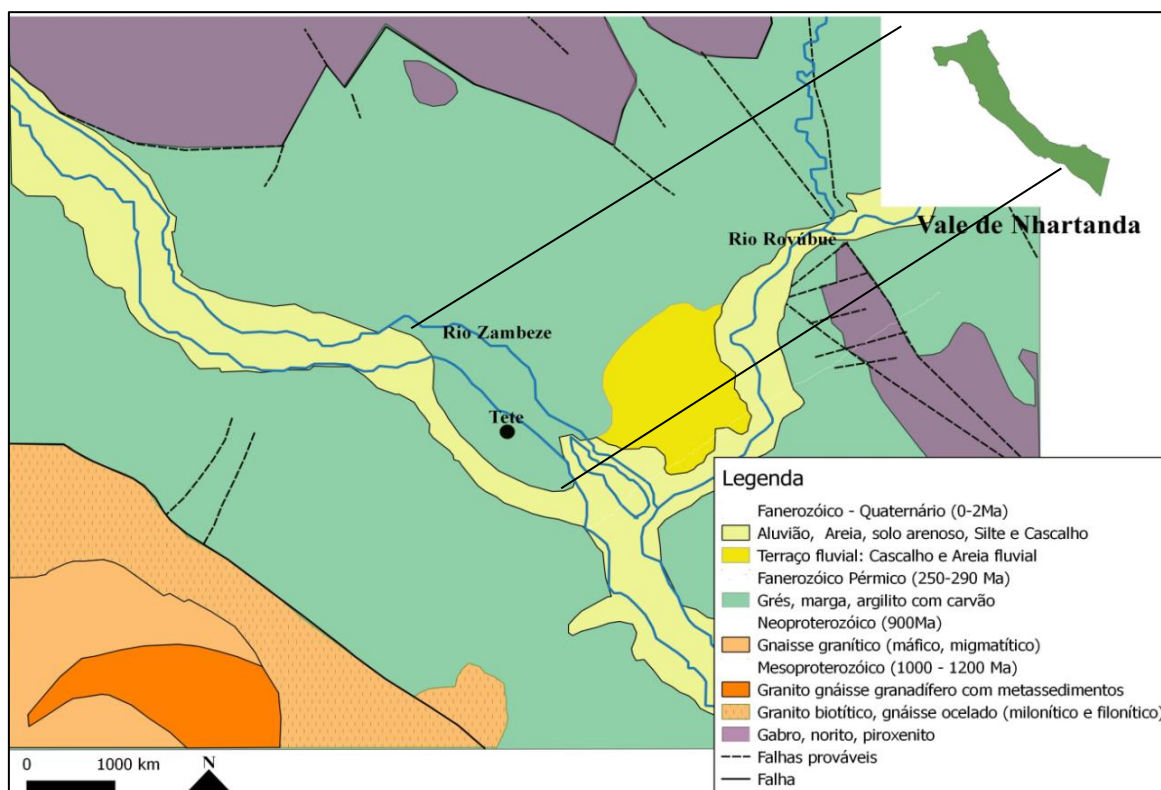


Figura 3.2: Carta geológica do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes (adaptado de AFONSO, 1978).

A actividade mineira no Vale de Nhartanda limita-se à extração de areia principalmente na foz do rio Chimadzi e de minerais de argila para a cerâmica local (Anexo 3.3.).

Os eventos geológicos dominantes no Vale de Nhartanda e suas imediações correspondem a fenómenos de basculamento e falhas tectónicas normais, seguidos por um período de sedimentação (WE CONSULT, 2016).

Segundo o USGS (2016), entre 1996-2005, não foram registados sismos de magnitude superior a 3, na escala de Richter. No entanto, o sismo ocorrido em 23/02/2006, com epicentro (Fig. 3.1a), situado a cerca de 560 km de Nhartanda, afectou o Centro e Sul do País.

O Vale de Nhartanda está incluído numa área de intensidade sísmica Baixa – III, de acordo com a Escala Internacional de Mercalli. Contudo, dada a sua proximidade ao Vale do Rift (Fig. 3.1a) que se encontra em separação estimada em 6 mm/ano, esta região é propensa à

ocorrência de sismos de maior intensidade, face à instabilidade geológica e susceptibilidade à ação dos agentes endógenos (USGS, 2016).

3.3. Geomorfologia

A génese do Vale de Nhartanda está ligada à evolução de um dos sistemas anastomosados do rio Zambeze (antigo meandro abandonado do rio) que esteve activo antes da implantação do atual padrão da planície de inundação. Esta evolução é uma consequência da deposição de materiais fluviais ocorrida durante as inundações periódicas do rio Zambeze e da existência de um contraste topográfico na área da Cidade de Tete (Fig. 3.3).

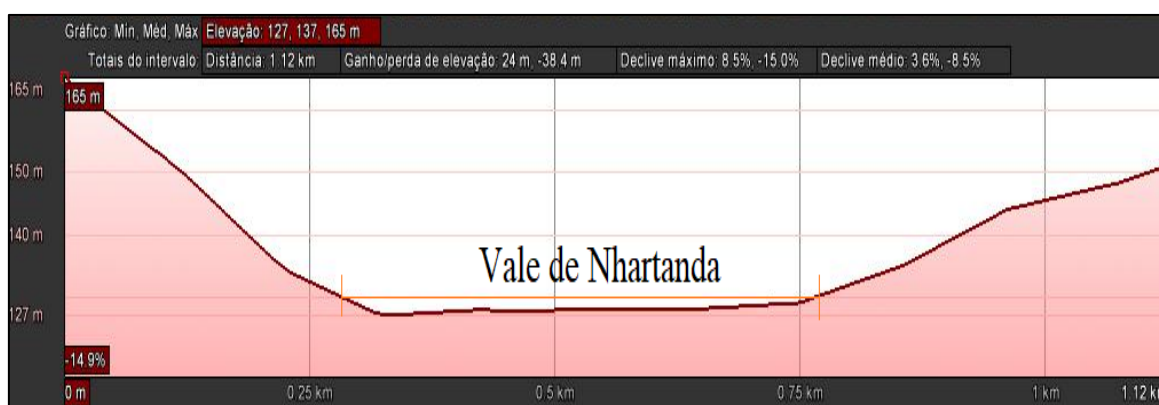


Fig. 3.3: Perfil Topográfico do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes.

O Vale de Nhartanda apresenta um relevo aplanado, com altitudes compreendidas entre 125-130m (Fig. 3.4), esculpido principalmente pelas águas fluviais, embora apresente uma descontinuidade induzida pelo aterro resultante da EN7 e da Av. 25 de Junho (Fig. 3.1c).

Esta topografia tende a elevar-se até os 133 - 134m nas regiões noroeste, nordeste e centro-oeste do Vale de Nhartanda, causado pelos aterros feitos pela população para a construção de residências e outras infra-estruturas.

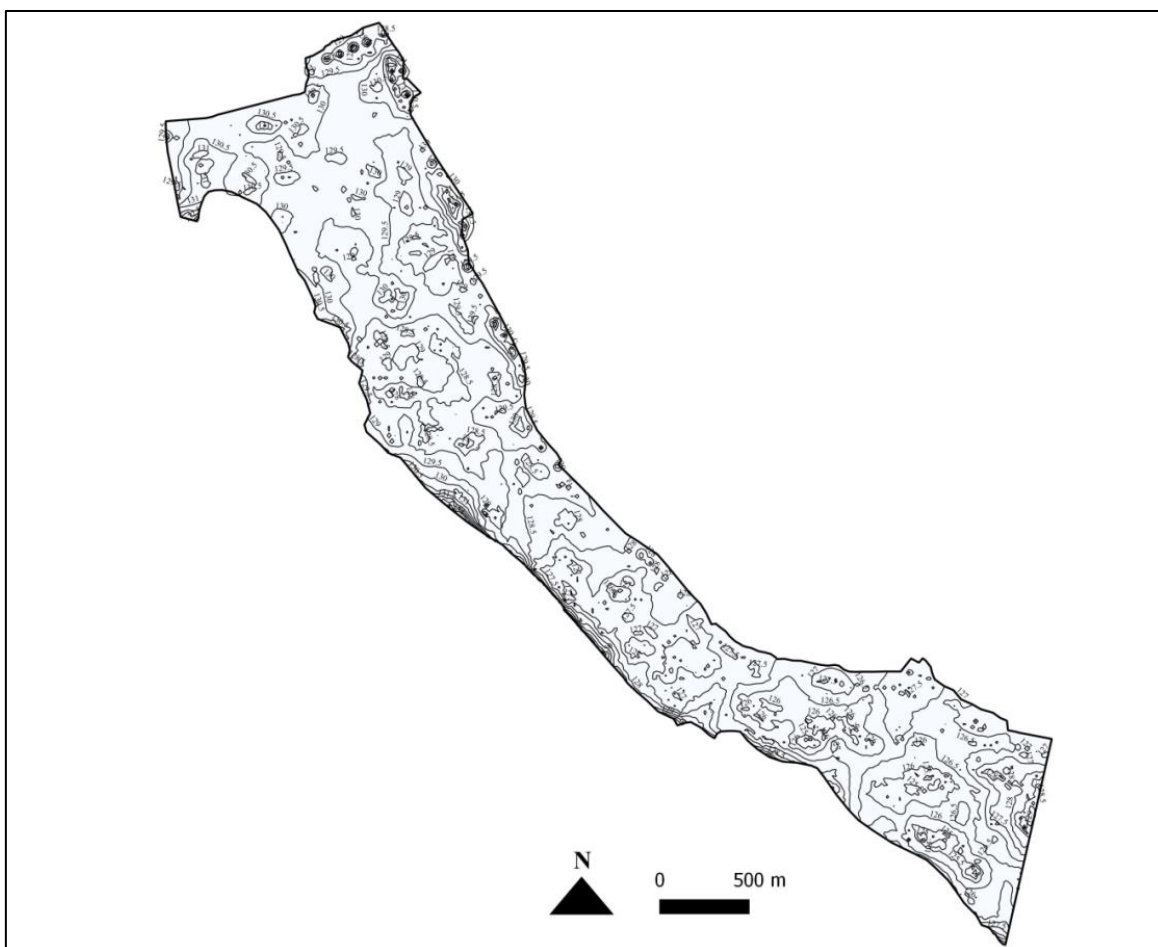


Figura 3.4: Topografia do Vale de Nhartanda.

O relevo no Vale de Nhartanda apresenta um ligeiro declive convergente para a região central. As altitudes máximas estão relacionadas com a deposição dos sedimentos provenientes do rio Zambeze, particularmente em períodos de inundação, enquanto que as áreas mais aplanadas poderão estar associadas à descompactação do solo por atividades agrícolas, favorecendo os processos erosivos.

3.4. Climatologia

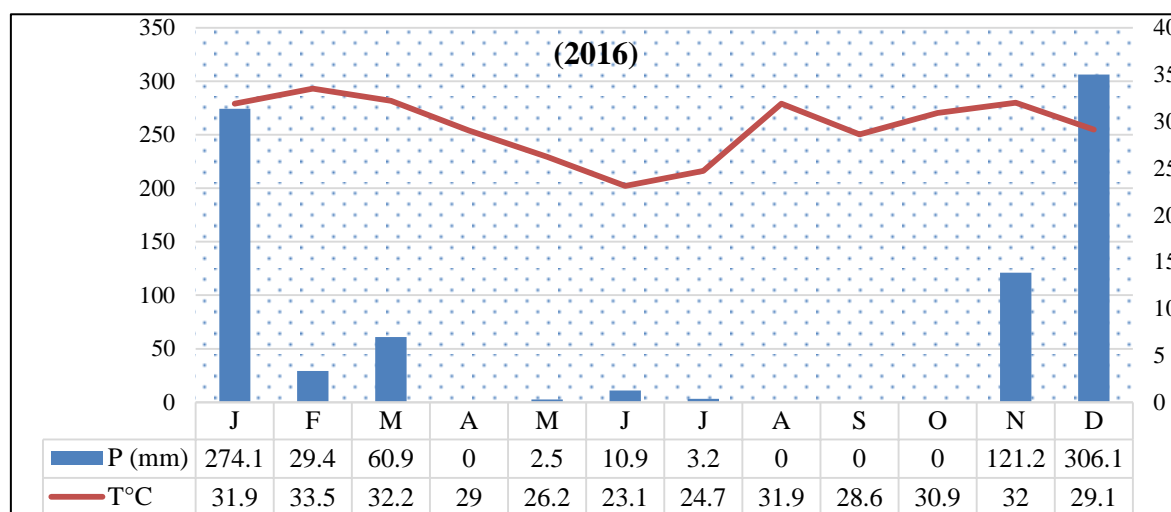
O Vale de Nhartanda está inserido na região climática Moçambique Norte, dominada por um clima Tropical Seco (MUCHANGOS, 1999). Nesta região, as variações de temperatura e precipitação permitem individualizar três sub-estações (Tab. 3.1) ao longo de um ano hidrológico.

Tabela 3.1: Sub-estações do ano da Cidade de Tete (COBA 2013).

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Quente e Húmida			Fresca e Seca					Quente e Seca		Quente e Húmida	

Na região, o clima Tropical Seco é influenciado pela CIT e pelos ventos alíseos e monçônicos que em conjunto determinam a ocorrência dos principais tipos de tempo nas sub-estações (MUCHANGOS, 1999). A humidade relativa do ar atinge os valores mais baixos no final da estação seca e o seu máximo em janeiro/fevereiro, em que o valor médio anual não excede os 65%. As temperaturas médias anuais são geralmente elevadas, na ordem dos 28°C, e a precipitação máxima anual raramente atinge e/ou excede os 800 mm (INAM-Tete, 2016).

Entre o ano de 2016 e o mês de Março de 2018, a temperatura e precipitação apresentam algumas variações nos valores máximos e mínimos observados (Figs. 3.5 & 3.6). Destaca-se o período seco, entre abril e outubro, com valores totais de precipitação praticamente nulos, e o período mais chuvoso, entre novembro e março, correspondendo a um valor de precipitação acima da média (1%) para 2016. Para 2017 e 2018 (Janeiro – Março) a precipitação foi de 86.1% e 16.1% respetivamente.

**Figura 3.5:** Diagrama termopluviométrico da Cidade de Tete, (adaptado de INAM – Tete, 2018).

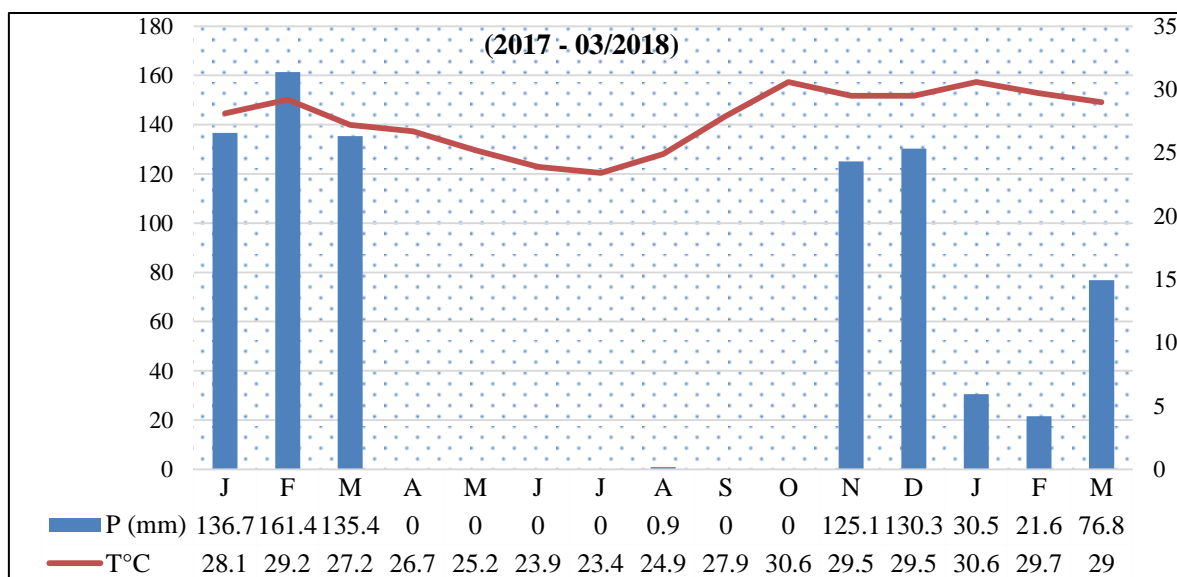


Figura 3.6: Diagrama termopluiométrico da Cidade de Tete (adaptado de INAM – Tete, 2018).

A combinação de elevada temperatura e baixa precipitação caracteriza esta zona de Moçambique como sendo uma das mais áridas do país. A extrema secura deste clima resulta da fraca influência oceânica, aliada às elevadas temperaturas médias anuais, em que o efeito de altitude não é suficiente para tornar o clima mais húmido (MUCHANGOS, 1999).

3.5. Hidrologia

A Cidade de Tete e o Vale de Nhartanda ocorrem na bacia hidrográfica do rio Zambeze. Este rio meandiforme e de regime perene, tem uma cota máxima de 118 m e um leito bem definido, cujas margens são ocupadas por vegetação e com sinais da ocorrência de erosão.

Segundo a HCB (2012), o rio Zambeze nasce nas montanhas de *Kalene Hill*, noroeste da Zâmbia, a uma altitude de 1 450m e desagua, em forma de Delta, no Oceano Índico, na Província da Zambézia (Moçambique), percorrendo um total de 2700 km, na orientação W-E. A sua área de ocupação total é estimada em 1 390 000 km², repartida por oito países da África Austral (Fig. 3.7).

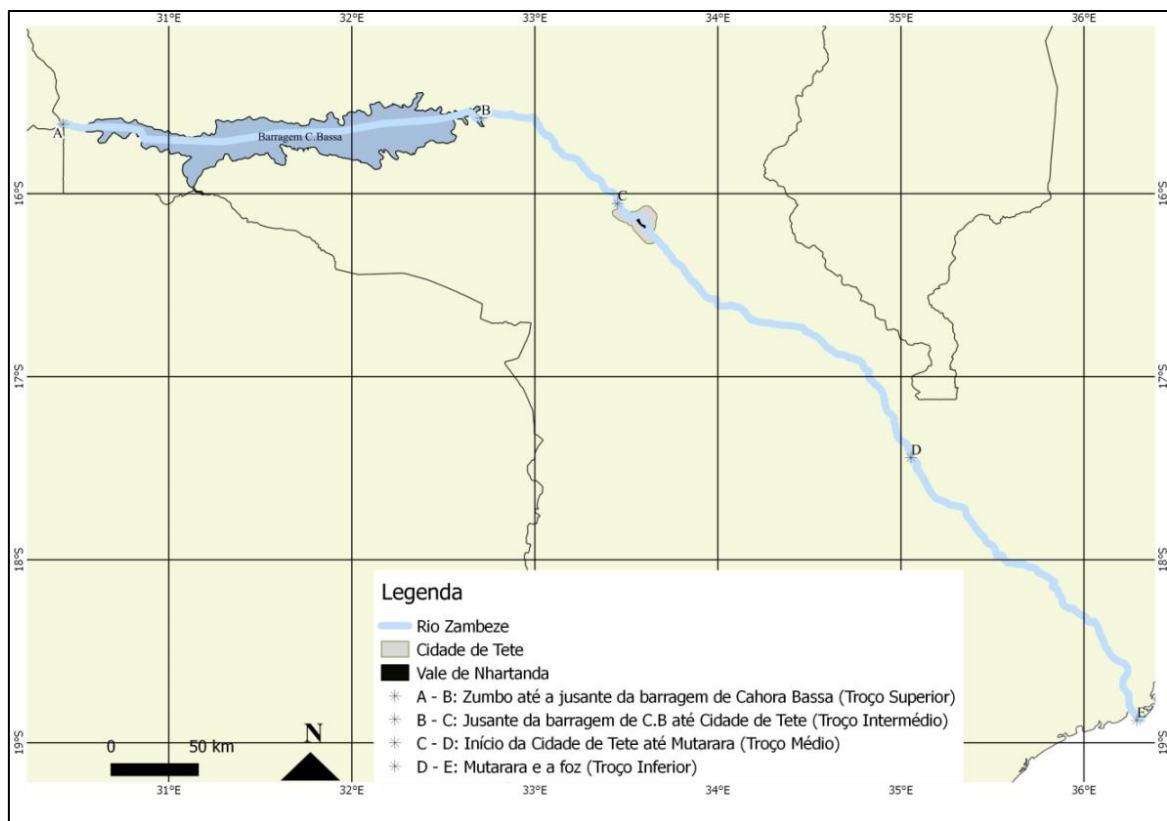


Figura 3.8: Mapa de Subdivisão do Baixo Zambeze (Adaptado de COBA, 2013).

O maior troço destas 4 subdivisões do baixo Zambeze é o médio com cerca de 261 km, que por sinal localiza-se a área de estudo – o Vale de Nhartanda. Depois deste, seguem-se os troços superior com 253 km, inferior com 217 km e, por fim, o intermédio com 114 km (Fig. 3.8).

Ao longo do tempo, o caudal médio no rio Zambeze apresentou dois momentos distintos, anterior e posterior à construção das duas barragens hidroelétricas, de Kariba e de Cahora Bassa (Fig. 3.7), com 180 km³ e 65 km³ de capacidade de armazenamento, respectivamente (IRMSA, 2015).

Antes da construção das duas barragens hidroelétricas, Kariba (1955 e 1960) e Cahora Bassa (1969 -1974) era frequente a ocorrência de cheias nos troços médio e principalmente no troço inferior (Fig. 3.8). Estes relatos de cheias no rio Zambeze remontam ao ano de 1830. Nos anos de 1952 e 1958, duas grandes cheias marcam os registos históricos desta região, o último com um caudal máximo registado na Cidade de Tete na ordem de 23 000 m³/s. Em 1969, o nível da água manteve-se acima do nível de caudal de cheia durante 222 dias (início de janeiro até meados de agosto) (RIBEIRO & DOLORES, 2011).

A capacidade de armazenamento das duas grandes albufeiras permite armazenar a água e regular o caudal do rio Zambeze, embora as grandes cheias continuem a ocorrer.

No ano de 1978, ocorreu uma cheia com um caudal de 19 000 m³/s na Cidade de Tete, com 8.29 metros acima da escala hidrométrica. Nos anos de 1989, 1997, 2007 e 2008 ocorreram igualmente outras cheias, embora de menor dimensão. Os dados históricos indicam, em média, a ocorrência de uma cheia em cada 5 anos, com o caudal máximo de 8 800 m³/s, em cada 10 anos, com um caudal de 11 000 m³/s e em 5 000 anos com caudal de 22 000 m³/s. (RIBEIRO & DOLORES, 2011).

Entre outubro de 1979 e março de 2018, o caudal médio anual do troço médio do baixo Zambeze apresenta uma reduzida variação ao longo do ano hidrológico, bem como, ao longo dos anos (1970.5 m³/s), decrescendo para valores de 1280 m³/s em anos muito secos, com intervalos de recorrência de 10 anos. Ao longo do dia, por sua vez, os caudais médios mantêm-se geralmente constantes (inferiores a 2 166.84 m³/s), salvo em situações excepcionais que ocorram na HCB. O caudal diário mínimo registado foi de 170.9 m³/s, em 16/06/1983, e o máximo de 7 789.5 m³/s, em 04/03/2001 (ARA ZAMBEZE, 2018).

Na Cidade de Tete, o Vale de Nhartanda constitui uma região constantemente inundada. Assim, devido ao risco de inundação nesta área, todas as zonas situadas a uma cota altimétrica inferior a 130 metros são consideradas como “não urbanizáveis” (Anexo 3.2).

Esta cota de referência para “risco de inundação / cheia” resulta da cota topográfica do rio Zambeze na estação da Cidade de Tete (118 metros) com a do pico de cheia registado em 1978 (8.29 metros) (COBA, 2012).

3.6. Hidrogeologia

Moçambique está dividida em 6 Províncias hidrogeológicas: **(i)** Complexo de Base (Pré-Câmbrico); **(ii)** Terrenos Vulcânicos (Karoo e pós Karroo); **(iii)** Bacia Sedimentar do Médio Zambeze (Karoo); **(iv)** Bacia Sedimentar de Maniamba (Karoo); **(v)** Bacia Sedimentar do Rovuma (Meso-Cenozóico) e; **(vi)** Bacia Sedimentar de Moçambique, a sul do Save (Meso-Cenozóico) (WE CONSULT, 2016).

O Vale de Nhartanda insere-se nas formações hidrogeológicas da bacia sedimentar do Médio Zambeze. Esta bacia é do tipo sinforme assimétrica, limitada por falhas normais, constituída por grés (finos, grosseiros e fossilíferos) e margas, interceptada por filões de doleritos (COBA, 2012).

O sistema aquífero do Vale de Nhartanda é intergranular, livre e isotrópico, subordinado ao rio Zambeze (Fig. 3.9), com caudais superiores a 200 m³/h e rebaixamento "insignificante"

(inferior a 2 metros) (COBA, 2012). Esta produtividade deve-se principalmente à ligação hidráulica (rio - aquífero), sem significativos estrangimentos, que depende da posição relativa dos níveis da água.

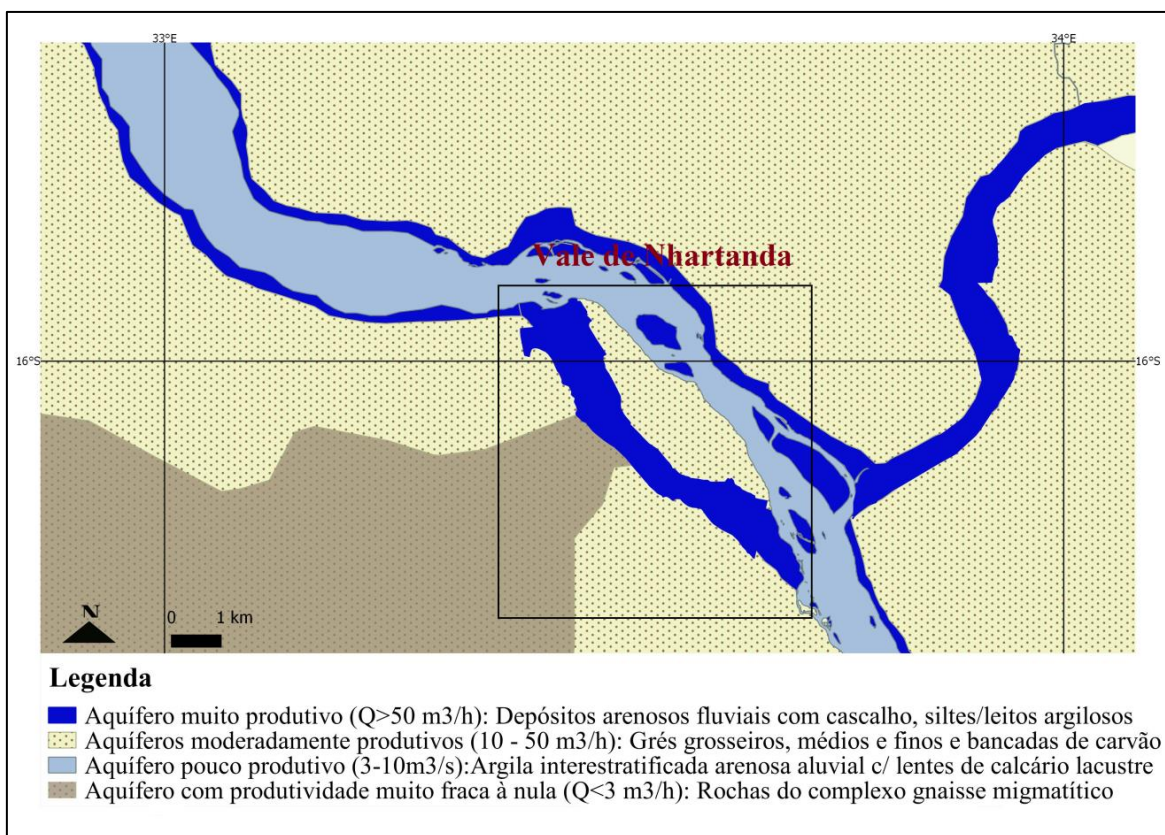


Figura 3.9: Mapa hidrogeológico do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes (Adaptado de DNA, 1987).

No aquífero do Vale de Nhartanda há escoamento natural, proveniente do rio Zambeze, desde a sua entrada no vale, a montante na Cidade de Tete, até à confluência novamente com o rio Zambeze, a jusante (Fig. 3.9). A força motriz deste escoamento superficial resulta da diferença de cotas piezométricas do nível da água ao longo do rio Zambeze, a montante e a jusante do Vale de Nhartanda. A exploração atual do aquífero do Vale de Nhartanda, através da extração de água e consequentes rebaixamentos associados, acelera a velocidade de escoamento natural e promove a infiltração na zona a montante.

3.7. Uso e ocupação do solo

O Vale de Nhartanda é predominantemente ocupado por solos de aluvionares escuros de textura fina, média e grosseira (MASA, 2014). As suas características físico-geográficas favorecem

ao desenvolvimento de diversas atividades (Fig. 3.10), que influenciam na sua qualidade ambiental e consequentemente na qualidade da água.

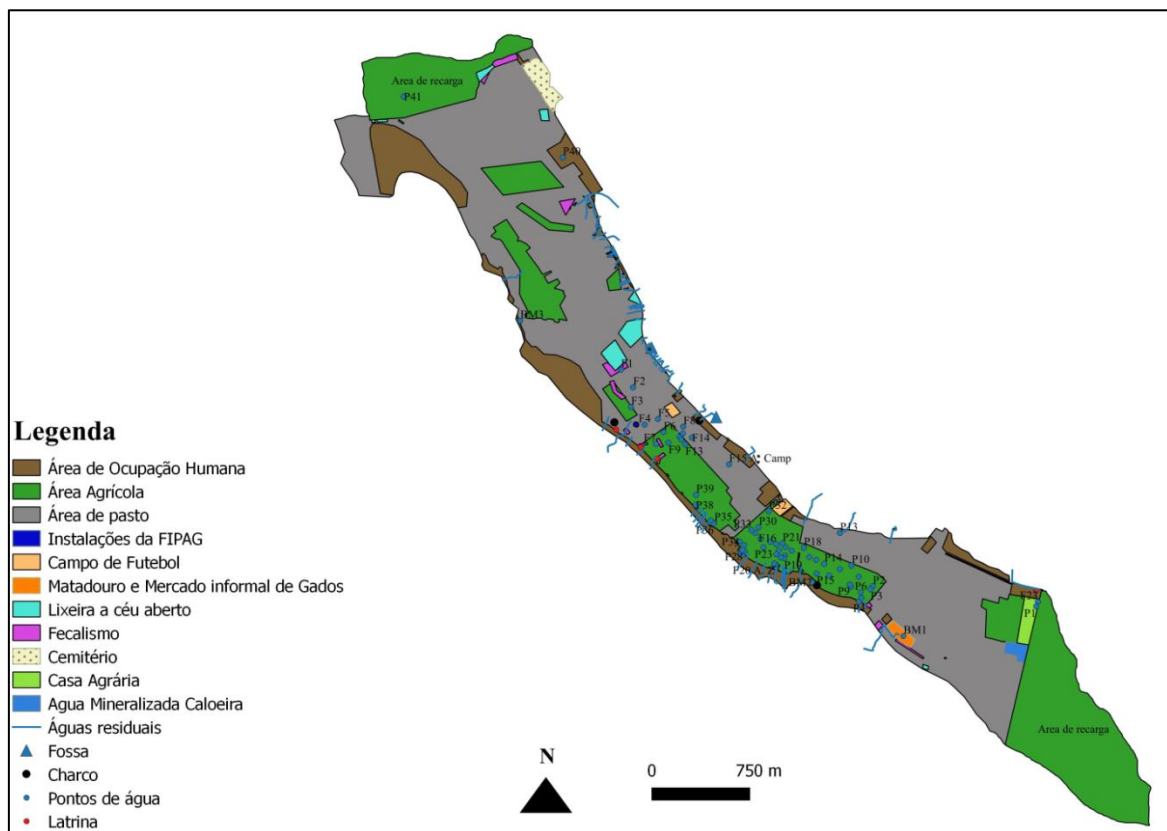


Figura 3.10: Ocupação do solo do Vale de Nhartanda.

A ocupação do Vale de Nhartanda é dominada por actividades agro - pecuárias e áreas de ocupação humana nas quais se incluem áreas residenciais, de prestação de serviços e fábricas artesanais de cerâmica. Toda a área do vale está sujeita a focos de contaminação pontual e difusa, associados à falta de saneamento básico na Cidade de Tete no geral (uma vez que os esgotos urbanos são drenados no rio Zambeze - Anexo 3.1) e no Vale de Nhartanda e áreas adjacentes. Acredita-se que todos os utentes do Vale (residentes, agropecuários, funcionários da FIPAG, jogadores de futebol, comerciantes informais e outros) depositam poluentes/contaminantes no solo sem qualquer protecção, colocando em perigo o ecossistema local.

As actividades que ocorrem ao longo do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes podem ser e/ou tornar-se uma ameaça para a qualidade da água subterrânea que ocorre no sistema aquífero, sendo um perigo para a população humana que a consome directa ou indirectamente (Anexo 3.3).

CAPÍTULO IV: AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO DO VALE DE NHARTANDA

4.1. Metodologia

Os desenvolvimentos dos resultados apresentados neste trabalho ocorreram em várias etapas (Fig. 4.1).

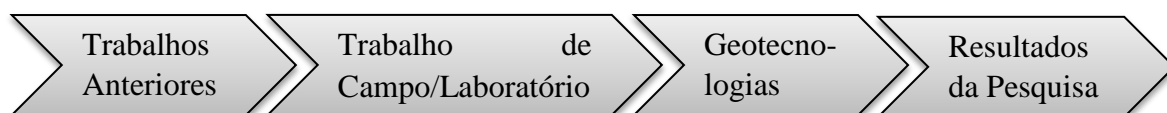


Figura 4.1: Etapas do trabalho da Pesquisa.

Antes da realização dos trabalhos de campo, foram efectuados, nos meses de Agosto e Setembro de 2017, contactos com algumas instituições Locais, como o Conselho Municipal da Cidade de Tete, FIPAG - Tete, Ara Zambeze e INAM – Tete, com o objectivo de obter não apenas a autorização para a realização deste estudo, mas também, alguns equipamentos e informações que complementam a bibliografia utilizada.

O levantamento dos trabalhos pretéritos de caracterização e investigação da área de estudo, permitiu um melhor conhecimento do Vale de Nhartanda, podendo ser destacados os estudos realizados pela COBA - Consultores de Engenharia e Ambiente & TÉCNICA Engenheiros e Consultores LDA (2012 & 2013), Profuro Internacional LDA (2012), WE CONSULT (2009 & 2016) e ARA ZAMBEZE (2016). Contudo, o sistema aquífero do Vale de Nhartanda carece de mais estudos detalhados, bem como, da realização de análises físico-químicas, espaciais e temporais, nas águas superficiais e subterrâneas, de forma a avaliar não apenas a produtividade, mas também a vulnerabilidade deste sistema aquífero.

Importa destacar, o importante contributo de algumas Instituições públicas e público-privadas de Moçambique que, através da disponibilização da informação técnica e científica, permitiu um maior enriquecimento deste trabalho (Tabela. 4.1).

Tabela 4.1: Instituições e informação cedida

Instituição	Informação/Dados
ARA-ZAMBEZE	Informações geológicas e hidrogeológicas.
INAM-Tete	Dados climáticos.

FIPAG	Informação relativa à produtividade de furos, recolha e análises laboratoriais da qualidade da água.
--------------	--

4.1.1. Estudos anteriores

Acredita-se que os estudos existentes sobre o Vale de Nhartanda remontam antes da década de 70 embora os registos oficiais sejam datados desde 1971 (Tabela. 4.2.).

Tabela 4.2: Alguns trabalhos anteriores sobre o Vale de Nhartanda (WE CONSULT, 2009).

Ano	Título	Atividade (s)
1971	de Vale Nhartanda	Estimativas de condutividade hidráulica em areias finas a médias a partir de quatro furos exploratórios no vale Vale de Nhartanda;
1989	Vale de Nhartanda e Matundo na área do rio Rovubué	Características hidráulicas obtidas a partir da instalação de piezómetros de profundidade rasa;
		O Levantamento de VES assistido, ao longo de três seções no vale de Nhartanda, na identificação de um canal mais profundo cortado no leito de arenito subjacente, especialmente na área central;
		Preocupação com a contaminação da superfície devido à remoção da unidade de topo de argila/argila siltosa sobreposta;
		Modelação numérica, em estado estacionário, que indicou uma taxa de captação de 200m³/h, representando 50% da água subterrânea estimada que flui através do vale;
2005	Vale de Nhartanda e Matundo de poços do campo de Rovubué	Construção de dois novos poços para substituir poços abandonados;
		Reabilitação de três poços no Vale de Nhartanda devido à deterioração;
		Modelação numérica, em estado estacionário, com um modelo de duas ordens de abstrações diárias máximas estimadas de 12000 m³/d para o campo de poços de Nhartanda Central.

4.1.2. Trabalhos de Campo

Os trabalhos de campo conheceram várias etapas, sendo iniciado principiando com o reconhecimento da área de estudo, que decorreu na segunda quinzena de Outubro de 2017 e nos períodos entre das 6:30h – 10:30h e das 16:00h – 18:00h, devido à forte radiação solar na

região. O cadastro dos pontos de água (Fig. 4.2a), com auxílio do receptor GPS Garmin 64, e a medição dos níveis freáticos (Fig. 4.2b), usando uma sonda elétrica de marca *SOLINST*, modelo 102 (Anexo 4.1), foram efectuados após o reconhecimento da área de estudo e prolongou-se até meados de Dezembro do mesmo ano.



Figura 4.2: Cadastro dos pontos de água e medição dos níveis freáticos.

Foram igualmente cadastrados potenciais focos de poluição (Anexo 3.3), entre o mês de Dezembro de 2017 e meados de Janeiro de 2018 e efetuada a medição da profundidade dos poços, mediante a aplicação do cabo da sonda elétrica (desligada) usada para medir a profundidade dos níveis freáticos.

A determinação das características naturais da água, para cada ponto de amostragem georreferenciado e selecionado, foi realizada a partir da segunda quinzena de Janeiro de 2018. “*In Situ*”, foram determinadas algumas características organolépticas (sabor e odor) e propriedades físico-químicas como a temperatura ($T\text{ }^{\circ}\text{C}$), pH, condutividade elétrica (CE), turvação (NTU) e sólidos totais dissolvidos (TDS), utilizando um medidor portátil multiparamétrico de marca HANNA modelo HI 7629829 (Anexo 4.2). Estas determinações são facilitadas pela existência de aparelhos que admitem efetuar as leituras no campo, permitindo deste modo a preservação das suas propriedades naturais depois de transportadas para o laboratório.

Para além destas determinações “*In Situ*”, foram efetuadas colheitas de amostras da água nos meses de Fevereiro e Março do corrente ano (2018), em pontos previamente selecionados, para a determinação laboratorial das propriedades químicas e biológicas respetivamente. Em cada ponto de amostragem, foi recolhido aproximadamente 1L de água, com equipamento e recipientes adequados e previamente lavados, acondicionados em malas térmicas e transportados até ao laboratório (Anexo 4.3 & Fig. 4.3).

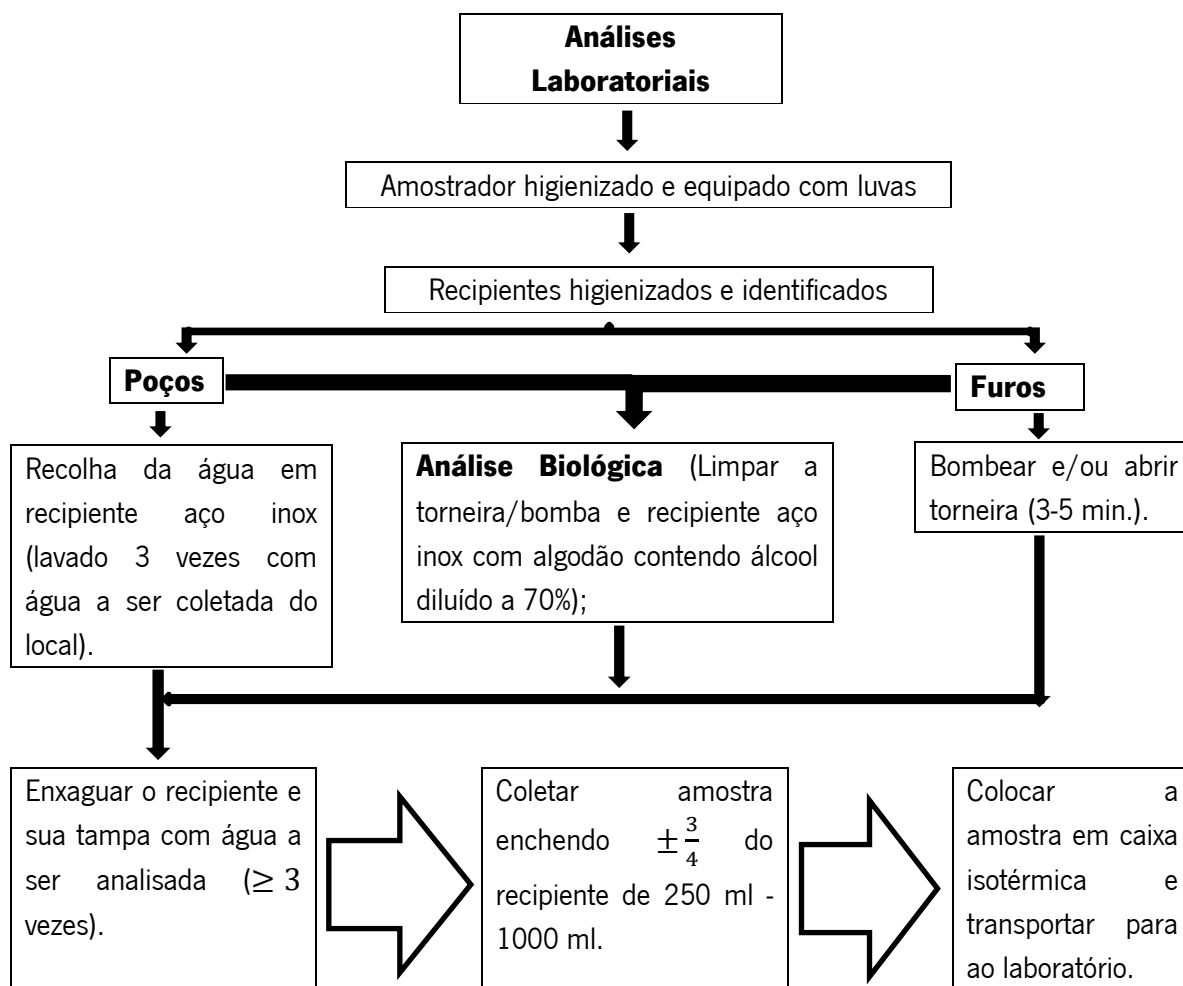


Figura 4.3: Processo de recolha, acondicionamento e transporte das amostras até ao laboratório.

No laboratório, foram determinados alguns parâmetros químicos e biológicos, previamente seleccionados de acordo com as condições existentes no Laboratório da FIPAG, Cidade de Tete, e com os cuidados adequados de modo a preservar as propriedades das amostras (Fig. 4.4).

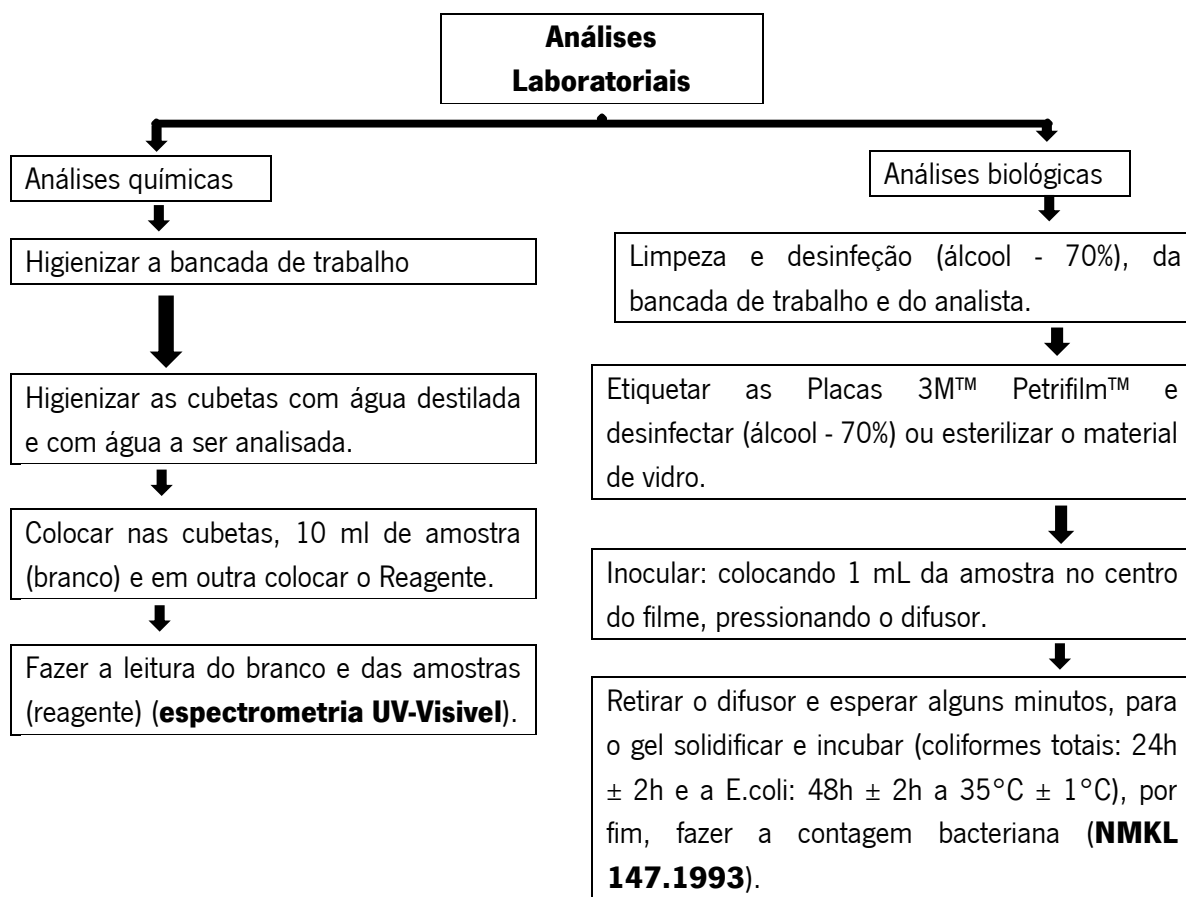


Figura 4.4: Procedimentos laboratoriais para as análises químicas e biológicas da água.

Com excepção da salinidade que foi obtida por um multiparâmetro portátil de marca Hach, modelo HQ 14d (Anexo 4.4a), os restantes outros parâmetros como a alcalinidade, dureza total e teor dos elementos de cloreto, cálcio, nitrato, nitrito, amónia, ferro total e manganês foram obtidos por Espectrofotometria UV-Visível, utilizando um Espectrofotómetro de bancada, marca HANNA, modelo HI 83200 (Anexo 4.4b). Para PARRON *et al.* (2011), a espectrofotometria UV-Visível é uma técnica analítica que utiliza a luz para medir as concentrações das soluções, através da interação entre estes. Baseia-se no aumento de energia em função do aumento da frequência da radiação incidida, pois, quando uma espécie química absorve energia na forma de fotões, os seus electrões ficam excitados e ocorre a transição orbital de mais baixa energia para outra de maior energia.

Igualmente foi realizado a Difração de Raios X para identificar minerais através da sua estrutura cristalina e a identificados os minerais pesados utilizando **bromofórmio**.

Todo o trabalho laboratorial foi realizado com o máximo cuidado e precisão possível tanto para não influenciar/alterar os resultados obtidos, bem como, protegendo o analista através da utilização de meios de proteção adequados (luvas, máscaras, bata, óculos).

As análises laboratoriais (químicas e biológicas), associadas com as efetuadas "*In Situ*" permitiram caracterizar e avaliar a qualidade da água do sistema aquífero do Vale de Nhartanda.

4.1.3. Geo/tecnologias

Após a análise dos trabalhos anteriores e realização das atividades de campo e laboratoriais, um conjunto de tecnologias foram aplicadas. Estas tecnologias permitiram produzir, processar, analisar e representar diversas informações.

Com a camera fotográfica *Nikon D3300* e o software *Microsoft Office Excel 2016* foi possível capturar diversas figuras que ilustram as atividades desenvolvidas no sistema aquífero do Vale de Nhartanda, os procedimentos e instrumentos utilizados em trabalhos de campo e a construção de diagramas termopluviométricos, respetivamente.

A georreferenciação dos pontos de água, focos de poluição e das atividades desenvolvidas no Vale de Nhartanda foram obtidas com a aplicação do receptor *GPS - Garmin 64* e que posteriormente exportados os dados para os *softwares Google Earth/Pro* e *Qgis 2.14* e *ArcGis 10.3*. Estes *softwares (Google Earth/Pro)* para além de possibilitarem obter as dimensões do Vale de Nhartanda e da Cidade de Tete e o perfil de elevação, também auxiliaram na aplicação dos *softwares Qgis 2.14* e *ArcGis 10.3* na construção de mapas temáticos (ex: ocupação do solo). De referir que, na elaboração do mapa topográfico, as curvas de nível foram geradas a partir do cruzamento do Google Earth que permitiu criar pontos, posteriormente convertidos em *shapefile* no *GPSVisualizer* e importados para o software *Qgis 2.14*.

Geralmente, o índice de vulnerabilidade GOD e DRASTIC é apresentado em mapas, cuja representação pode ser feita manualmente traçando-se o contorno de cada um dos três e sete fatores respetivamente, sobrepondo-os em um mapa final, ou mediante a aplicação de geotecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (e.g., *ArcGis 10.3* e *Qgis 2.14*). Contudo, devido à uniformidade dos índices de vulnerabilidade obtida para os métodos utilizados, os resultados são apresentados detalhadamente sob a forma de tabelas.

4.2. Recolha e análises dos pontos de água

Durante o trabalho de campo foram registados e georreferenciados sessenta e sete pontos de água, embora possam existir mais pontos distribuídos pela área de estudo (Tabela. 4.3).

Tabela 4.3: Pontos de água cadastrados.

Tipos de Pontos de água	Quantidade	Proprietário	Operacionalização
Furos	26	01 Casa Agrária	Operacional
		01 Associações dos Camponeses	Inoperacional
		02 Ara Zambeze	Operacional
		19 FIPAG	13 Operacionais
		03 DPOPHRH – Tete	Operacional
Poços	41	Camponeses	33 Operacionais

Os pontos de água identificados encontram-se distribuídos aleatoriamente ao longo do Vale de Nhartanda, com maior concentração na sua região central, fortemente afectada e/ou circundada por diversas fontes de contaminação, que directa ou indirectamente afectam a qualidade da água (Fig. 3.10).

Dos vários pontos de água, foram seleccionados para a amostragem vinte e seis locais para recolha e análise da água, sendo quinze correspondentes a furos (F₁, F₃, F₅, F₆, F₇, F₈, F₉, F₁₀, F₁₂, F₁₃, F₁₄, F₁₈, F₂₂, B₁ e B₃), que abastecem água a Cidade de Tete "antiga", e onze poços privados (P₁, P₄, P₁₁, P₁₃, P₁₈, P₂₀, P₂₂, P₃₁, P₃₈, P₄₀, P₄₁), utilizados na rega de campos agrícolas e, por vezes, para consumo doméstico (Figs. 3.10 & 4.5). A selecção dos pontos de amostragem teve por base as informações existentes, bem como, a possibilidade de recolha de amostras na área de estudo uma vez que algumas áreas são inacessíveis devido à existência de plantas espinhosas e por vezes ocorrem alguns répteis (cobras, crocodilos e salamandras), aracnídeos (escorpiões), para além do impedimento dos proprietários nas suas áreas agrícolas.

Apesar do sistema aquífero do Vale de Nhartanda constituir um manancial de água subterrânea de onde provem a totalidade da água que abastece a população do município da Cidade de Tete "antiga", este sistema está exposto e ameaçado por diversos focos de contaminação que ocorrem não apenas ao longo do vale e áreas adjacentes, e agravadas pela descarga de esgotos sanitários a céu aberto e águas residuais não tratadas no rio Zambeze, a partir da região meridional do vale - zona de recarga (Fig. 4.5 e Anexo 3.1). Além da inexistência de ETAR na região da Cidade de Tete, desde a nascente até atingir o Vale de Nhartanda o rio Zambeze atravessa áreas urbanizadas, agropecuárias e mineiras, cujos impactos contribuem para alteração da qualidade da água.

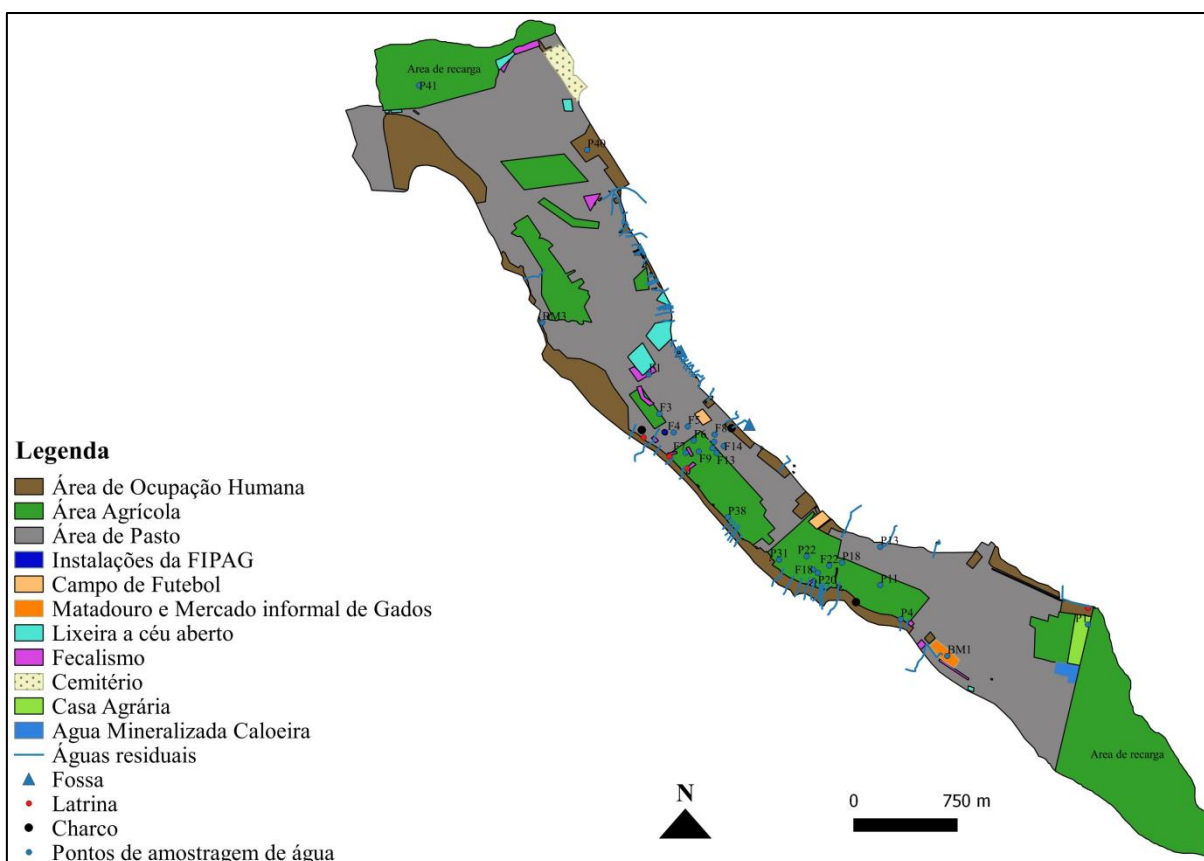


Figura 4.5: Pontos de amostragem de água e potenciais fontes de contaminação.

4.3. Avaliação espacial da qualidade da água do Vale de Nhartanda

O conhecimento das propriedades da água subterrânea (físicas e organolépticas, químicas e biológicas) e avaliação da sua qualidade, são de extrema importância para que as empresas de abastecimento de água (privadas e/ou estatais), órgãos municipais e ambientais possam efectuar com eficiência e eficácia o planeamento, gestão e proteção deste recurso hídrico subterrâneo.

Sendo a água um solvente universal, a composição química da água subterrânea depende em grande parte da composição e das propriedades físicas do solo e das rochas em que esteve em contato, do tempo de permanência e da qualidade antecedente da mesma. A água subterrânea do Vale de Nhartanda reflete ainda a relação entre estes processos com os produtos resultantes das atividades humanas, que vai sendo adquirida ao longo do seu trajeto, manifestada através dos poluentes associados particularmente às actividades domésticas e agrícolas predominantes na área do Vale de Nhartanda (ex: efluentes líquidos e domésticos, chorumes provenientes de depósitos de resíduos domésticos, descargas gasosas e de material particulado na atmosfera, fertilizantes, entre outros). Em geral, a qualidade da água subterrânea tende a ser relativamente uniforme ao longo do aquífero, tanto espacial como temporalmente, mas grandes

diferenças na qualidade da água subterrânea do Vale de Nhartanda podem ser observadas (FEITOSA & FILHO, 2000).

A recolha sistemática de informação sobre as características organoléticas e as propriedades físico-químicas e biológicas da água fornece uma importante base para a avaliação da qualidade da água e para prever possíveis potenciais focos de contaminação (SWRPC, 2002). Deste modo, foram analisadas as características físico-químicas e biológicas das águas do Vale de Nhartanda de forma a obter um conhecimento indicador da qualidade da água nesta região.

Os parâmetros medidos “*in situ*” conjuntamente com as características organoléticas da água podem não ser suficientemente objectivos na avaliação da qualidade da água, pelo que foram complementadas com análises químicas e biológicas laboratoriais. Contudo, devido aos avultados custos envolvidos na sua realização e exigência de pessoal especializado para o efeito, estas análises nem sempre foram realizadas sistematicamente, no período compreendido entre 2016 – 2018, pelo que não será possível a apresentação de alguns dados históricos.

4.3.1. Parâmetros físico-químicos e organoléticos

Os parâmetros físico-químicos e organoléticos referem-se, a medições indiretas de componentes químicos presentes na água, que podem ou não ser tóxicos para o ambiente e saúde humana (CNA, 2007). Dentro destes considera-se a cor, odor e sabor, Temperatura, turvação, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, pH, Alcalinidade, Dureza total, Salinidade, Cloretos, Cálcio, Ferro Total, Manganês, Nitratos, Nitritos e Amónia entre outros.

- **Cor**

A cor é um importante e "imediato" indicador de qualidade da água e resulta da reflexão da luz em partículas minúsculas, de dimensões inferior a 1 μm (colóides), finamente dispersas, de origem orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) ou mineral (resíduos industriais, compostos de ferro e manganês). Consideram-se dois tipos de cor: (i) a verdadeira, resultante das substâncias dissolvidas após filtrada a água e (ii) a aparente, causada pela “cor verdadeira” mais o efeito dos sólidos suspensos (ZUANE, 1996).

No Vale de Nhartanda, a cor aparente da água é inferior a 15 uH (unidades Hazen), ou seja, não excede o VMA definido pelo MISAU e pela OMS (COBA, 2013). De salientar, que estes dados foram obtidos há mais de 8 anos. A inexistência de aparelhos apropriados, como fotómetro

ou colorímetro, faz com que a avaliação deste parâmetro seja subjetiva, isto é, baseada na observação macroscópica a “olho desarmado”.

- **Odor e Sabor**

O odor e sabor da água são duas características que se manifestam conjuntamente e constituem as determinações organoléticas subjetivas (FEITOSA & FILHO, 2000). De um modo geral, a presença de sabor e de odor na água bruta pode estar associada aos seguintes fatores: (i) presença de constituintes inorgânicos (ex: ferro, cloreto, sulfatos, gás sulfídrico, entre outros) em concentrações elevadas; (ii) presença de compostos orgânicos provenientes de fontes antropogênicas (ex: fenóis, nitrofenóis), compostos aromáticos (ex: tetracloreto de carbono, tetracloroetileno) ou solventes de hidrocarbonetos halogenados e; (iii) concentrações elevadas de ferro e manganês, resultantes do material físico utilizado no sistema público de distribuição da água. O crescimento de microorganismos nos furos e nas redes de distribuição também tem sido uma das causas de inúmeros problemas de odor e sabor (CNA, 2007). Em águas tratadas, o odor e o sabor podem ser associados à presença de elevadas concentrações do agente desinfetante aplicado. A tabela 4.4 descreve os principais sais e gases que conferem sabor à água subterrânea.

Tabela 4.4: Principais sais e gases que conferem sabor à água subterrânea (FEITOSA & FILHO, 2000).

Sais e Gases	Fórmula	Sabor
Cloreto de Sódio	NaCl	Salgado
Sulfato de Sódio	Na ₂ SO ₄	Ligeiramente salgado
Bicarbonato de Sódio	NaHCO ₃	Ligeiramente Salgado a Doce
Carbonato de Sódio	Na ₂ CO ₃	Amargo e Salgado
Cloreto de Cálcio	CaCl ₂	Fortemente amargo
Sulfato de Cálcio	CaSO ₄	Ligeiramente amargo
Sulfato de Magnésio	Mg SO ₄	Ligeiramente amargo
Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	Amargo e Doce
Gás Carbônico	CO ₂	Picante

O odor e sabor que estes compostos podem conferir dependem dos níveis de concentração em que são encontrados nas águas. Nas águas do Vale de Nhartanda, a água tem um sabor maioritariamente salgado, e com um odor a ferro na água dos furos e a argila na dos

poços, sendo influenciado pelo meio envolvente. Contudo, esta apreciação é subjetiva, o que dificulta o estabelecimento de valores-limite para estas características organoléticas.

Estima-se que 50% da população de Moçambique e do Mundo consome água com “mau gosto” para teores superiores a 465 mg/L de cloreto de sódio, 47 mg/L de Mg e 350 mg/L de Ca. Estima-se que em águas com uma concentração em Fe de 0.05 mg/L, Cu de 2.5 mg/L, Mn de 3.5 mg/L e de zinco 5 mg/L resulta um sabor desagradável. De todas as substâncias indicadas, pode referir-se que o ferro é uma das que causa os maiores problemas (CNA, 2007). A água destinada ao consumo humano deve ser completamente inodora e insípida (BR, 2004), pelo que o sabor e odor podem ser usados como indicador ou sinal de alerta para ocorrência de substâncias indesejadas.

- **Temperatura**

A temperatura é um parâmetro muito importante na monitorização da qualidade de águas subterrâneas. Por um lado, o aumento da temperatura da água é proporcional à velocidade das reações, em particular as de natureza bioquímica de decomposição de compostos orgânicos. Por outro lado, diminui a solubilidade de gases dissolvidos na água, em particular do oxigénio, necessário aos processos de decomposição aeróbia (FUNASA, 2014).

Nas águas subterrâneas, a temperatura está condicionada pelos materiais por onde circula sendo influenciada por um lado, pelo grau geotérmico gerado por radioactividade (urânio e tório), géisers, vulcanismo e por outro lado, pela temperatura atmosférica, particularmente nos aquíferos menos profundos (LIMA, 2010).

A temperatura das águas pouco profundas aproxima-se da temperatura média anual do ar, já que a sua origem é exclusivamente meteórica (LIMA, 2010). Na área de estudo, a temperatura média anual atmosférica (Figs. 3.4 & 3.5) é aproximadamente igual e/ou ligeiramente inferior à da água subterrânea do Vale de Nhartanda registada de 2016 a março de 2018 (Fig. 4.6). No período analisado, não foram observadas diferenças significativas na temperatura das águas subterrâneas, tendo se verificado que as temperaturas máximas, no ano de 2016, ocorreram nos meses de março e novembro e, no ano de 2017, nos meses de abril e outubro (Fig. 4.6).

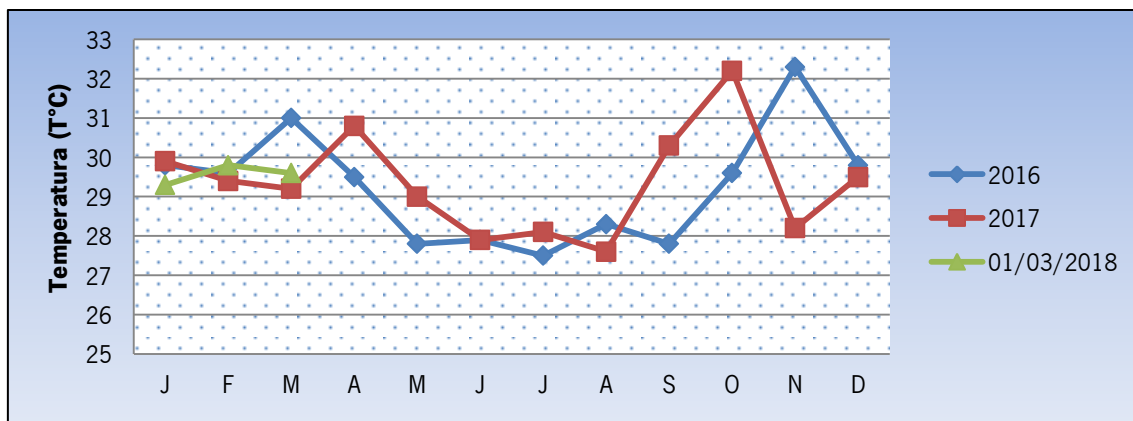


Figura 4.6: Temperatura da água do Aquífero do vale de Nhartanda (FIPAG, 2017).

Tendo em conta a relação entre a temperatura da água (t) e a temperatura média anual atmosférica (t_m), as águas subterrâneas podem ser classificadas em: (i) hipertermais ($t > t_m + 4^\circ\text{C}$); ortotermas ($t = t_m$ a $t_m + 4^\circ\text{C}$) e hipotermas ($t < t_m$) (SCHÖELLER, 1962). De acordo com esta classificação, as águas do sistema de aquífero do vale de Nhartanda são classificadas de águas ortotermas, embora possam ocorrer também águas hipotermas.

• Turvação

A turvação é uma medida da clareza da água (ou transparência), ou seja, é uma medida do grau de interferência à passagem da luz na água causada pela presença de partículas suspensas ou dissolvidas nela. A turvação da água indica o quão nebulosa ou lamacenta a água é (JI, 2008).

A turbidez promove um maior desenvolvimento de microorganismos, uma vez que serve como superfície para alimentá-los, permite a sua reprodução e protege-os das substâncias desinfetantes que penetram nas partículas (FUNASA, 2014). Normalmente, a turvação da água subterrânea é muito baixa (< 5 NTU) (CNA, 2007). No sistema aquífero do Vale de Nhartanda, a turvação apresenta valores elevados principalmente na subestação quente e húmida, excetuando os furos B₁ e B₃ com registos de turvação apenas nos meses de janeiro à março de 2018 (Fig. 4.7).

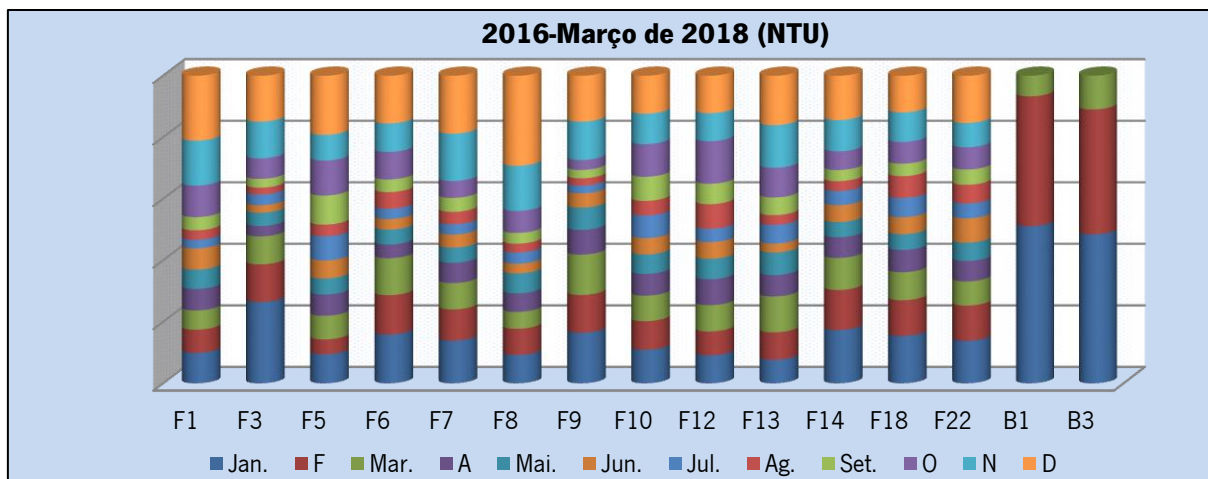


Figura 4.7: Turvação da água de furos do Aquífero de Nhartanda (FIPAG, 2017).

Na água dos poços, a turvação varia entre 5.1 e 40 NTU, atingindo os valores mais elevados nos poços P₁₈ e P₃₈ (Fig. 4.8).

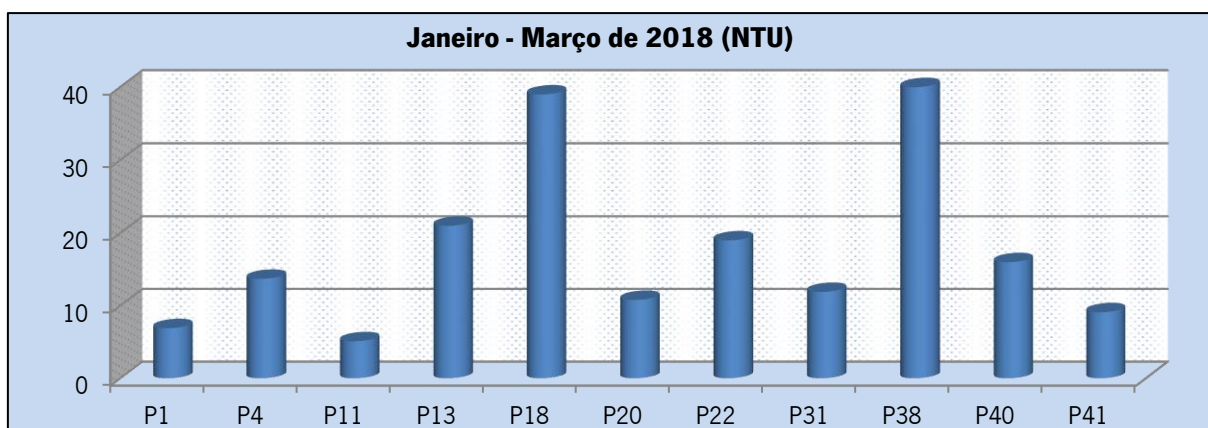


Figura 4.8: Turvação da água de poços do Aquífero de Nhartanda.

Com exceção de B₁ e B₃, todos os pontos de água apresentam unidades de turvação (NTU) acima dos VMA pela MISAU (5 NTU). Estes valores são mais elevados na época chuvosa, altura do ano em que parte do vale fica inundada e arrasta por escorrência superficial diferentes materiais. Entre as principais causas de turvação da água no Vale de Nhartanda, pode ser a intensa atividade agrícola que promove a remoção/erosão do solo e elimina parte da cobertura vegetal, com a qual são libertadas partículas coloidais e/ou em suspensão (argilas, areias, matéria orgânica e inorgânica, plâncton e outros organismos microscópicos) que atingem a água, obstruindo a transmissão da luz e aumentando a turvação. Também, pode ser referido o facto desta água ter origem no aquífero aluvionar do rio Zambeze, cujo percurso e tempo de residência é relativamente

curto. Outros fatores, como a exposição (poços), infiltração por deficiente construção dos furos e, reduzida manutenção dos equipamentos, promovem um incremento na turvação da água.

- **Condutividade Elétrica (CE) e Total de Sólidos Dissolvidos (TDS)**

A condutividade elétrica pode ser referida como a capacidade da água em conduzir a corrente elétrica, pelo que a presença de diferentes aniões e cátions em concentrações variadas leva a diferentes valores de CE da água (VOUDOURIS & VOUTSA, 2012).

A CE está fortemente dependente da temperatura da água e do TDS. À medida que a temperatura aumenta, a água torna-se menos viscosa e tem um maior movimento de eletrões, permitindo o fluxo de corrente eléctrica (LIMA, 2010).

A CE da água é extremamente variável. A água pura é muito pouco mineralizada, com valores de CE aproximadamente de $0.05\mu\text{S}/\text{cm}$, devido a presença de iões H^+ e OH^- , resultantes da dissociação das próprias moléculas da água, enquanto que a água desionizada tem uma CE entre $0.5\mu\text{S}/\text{cm}$ e $3\mu\text{S}/\text{cm}$ (LIMA 2010).

As águas naturais, por sua vez, normalmente apresentam valores de CE na ordem de 10-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FUNASA, 2014). Nas águas subterrâneas do Vale de Nhartanda, os valores de CE são geralmente superiores a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 4.9).

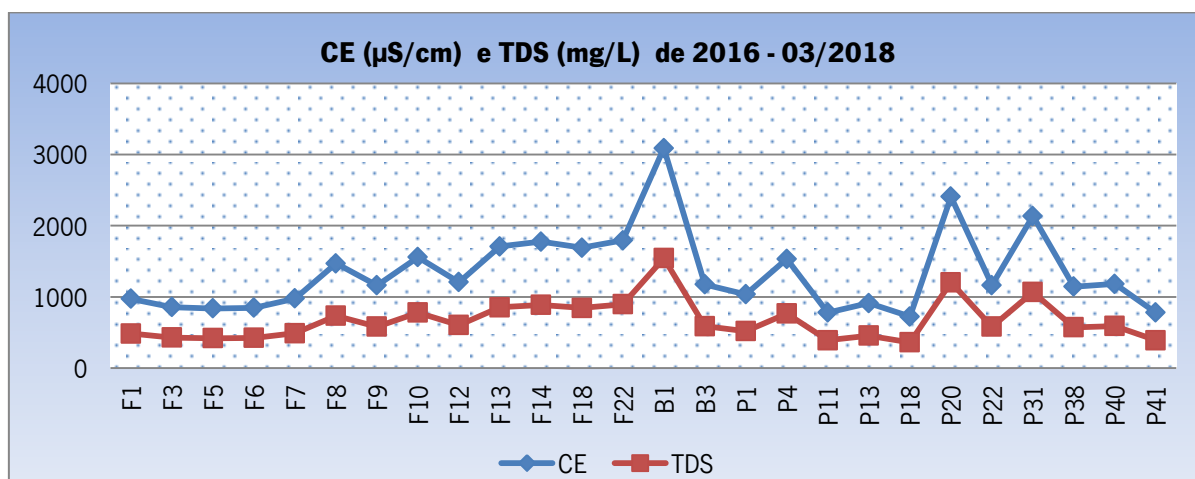


Figura 4.9: Valores médios de CE e TDS das águas do sistema aquífero de Nhartanda (FIPAG, 2018).

Os valores de CE nos furos variam entre 602 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 3090 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com um valor médio de 1381 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e desvio padrão de 590.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto que nos poços, varia entre 724 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 2408 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com um valor médio de 1254 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e desvio padrão de 557.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ambos com um coeficiente de variação de 0.4%.

Os elevados valores de CE (Fig. 4.8) refletem o efeito negativo da atividade antropogénica (ex: agro-pecuária, deposição de resíduos sólidos e águas residuais, entre outros) nas águas subterrâneas do sistema aquífero do Vale de Nhartanda.

Parte destes materiais orgânicos e inorgânicos é dissolvida na água, e a sua soma constitui o TDS (FETTER, 2000). Nas águas subterrâneas, a quantidade de TDS aumenta com o tempo de permanência (ZAPOROZEC *et al.*, 2004).

Nas águas do Vale de Nhartanda, foram obtidos valores de TDS entre 362 (P₁₈) e 1545 (B_i) mg/L (Fig. 4.9), verificando-se uma variação semelhante para a CE e TDS, sendo directamente proporcionais (PEDROSA & CAETANO, 2002).

Num estudo realizado pela OMS, foi indicada a seguinte classificação da água em função do teor em TDS (Tabela 4.5).

Tabela 4.5: Classificação da água segundo o teor em TDS (mg/L) (Adaptado de WHO, 2003).

Excelente	Boa	Regular	Pobre	Inaceitável
TDS < 300	300 – 600	600 – 900	900 – 1200	>1 200

Com base na classificação da WHO, pode-se afirmar que a maior parte da qualidade da água do sistema aquífero do Vale de Nhartanda varia entre boa (F₁, F₃, F₅, F₆, F₇, F₉, B₃, P₁, P₁₁, P₁₃, P₁₈, P₂₂, P₃₈, P₄₀ e P₄₁) a regular (P₄, F₈, F₁₀, F₁₂, F₁₃, F₁₄, F₁₈ e F₂₂), com excepção do poço P₃₁ que é pobre e do B_i e P₂₀ que são inaceitáveis (Tabela 4.5).

O TDS provém de restos de vegetais, construções, sedimentos, plâncton, resíduos domésticos e/ou de esgotos, agro-tóxicos, rochas, solos e partículas suspensas no ar que podem conter bicarbonato de cálcio, nitrogénio, fósforo, enxofre e outros minerais. No caso específico da água dos pontos B_i e P₂₀ e P₃₁, o elevado valor de TDS pode estar relacionado com o material (ferro, alumínio) e elevada poluição proveniente da deposição dos excrementos de animais/humanos e dos resíduos, bem como, da sua exposição respectivamente.

É verdade que altos níveis de TDS estão geralmente associados a um sabor mais forte e uma sensação mais proeminente na boca e também pode indicar a presença de minerais tóxicos e a dureza da água, o que causa a acumulação de incrustações em tubos e válvulas, inibindo o seu desempenho de forma eficiente. Um aumento da quantidade de TDS, aumenta a turbidez, reduzem o teor de oxigénio dissolvido e induzem ao aquecimento da água. Desta forma, constata-

se que as principais fontes de substâncias sólidas nas águas estão associadas à intervenção humana no ambiente.

- **pH**

É um parâmetro físico-químico que reflecte a concentração de iões H^+ na água. O balanço entre a concentração dos iões hidrogénio (H^+) e hidróxido (OH^-) determina o carácter ácido ou básico da água. Os principais fatores que determinam o pH da água são o gás carbónico dissolvido e a alcalinidade. Na escala de Sorënsen, o pH de uma solução varia entre 0 e 14, sendo ácida, neutra ou alcalina conforme o valor de pH seja inferior, igual ou superior a 7, respetivamente. Em águas subterrâneas, o valor de pH varia geralmente entre 5.5 e 8.5 (FEITOSA & FILHO, 2000).

No sistema aquífero de Nhartanda, para o período compreendido entre janeiro 2016 e março de 2018, os valores de pH da água dos furos oscilaram entre 7.14 - 7.99, enquanto que nos poços artesanais (janeiro – março de 2018) entre 7.21 e 7.61, portanto dentro do intervalo de VA para águas subterrâneas (pH: 6.5-8.5) estabelecidos pela MISAU e pela OMS.

O valor de pH = 7 não tem efeitos nocivos para a saúde, mas também não proporcionam benefícios. O pH entre 7 - 10 significa que a água é alcalina, ou seja, a água ideal para a nossa saúde, pois, possui um poder de hidratação superior às demais águas (CNA, 2007). O sistema aquífero de Nhartanda apresenta características de uma água alcalina, resultante provavelmente da mistura entre a água subterrânea salobra e a água do rio.

- **Alcalinidade**

É a medida total das substâncias presentes numa água, capazes de neutralizar ácidos, ou seja, é a quantidade de substâncias existentes numa água que atuam como tampão. Em águas subterrâneas, a alcalinidade é devida principalmente à ocorrência de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Algumas substâncias minerais como silicatos, boratos, fosfatos e amónia também podem influenciar a alcalinidade da água. Os principais compostos que contribuem para a alcalinidade de uma água em função do seu pH são descritos na Tabela. 4.6 (ZUANE, 1996).

Tabela 4.6: Principais substâncias que contribuem para a alcalinidade de uma água (ZUANE, 1996).

pH > 9.4	pH entre 9,4 e 8.3	pH entre 8.3 e 4.6	pH < 4.6 -3.0
Hidróxidos e carbonatos.	Carbonatos e bicarbonatos.	Bicarbonato.	Ácidos minerais.

A alcalinidade das águas do sistema aquífero do Vale de Nhartanda é influenciada predominantemente pelo teor de bicarbonatos, e apresenta valores entre 135 a 400 mg/L de CaCO_3 , sendo a dos furos tende mais elevada que a dos poços (Fig. 4.10).

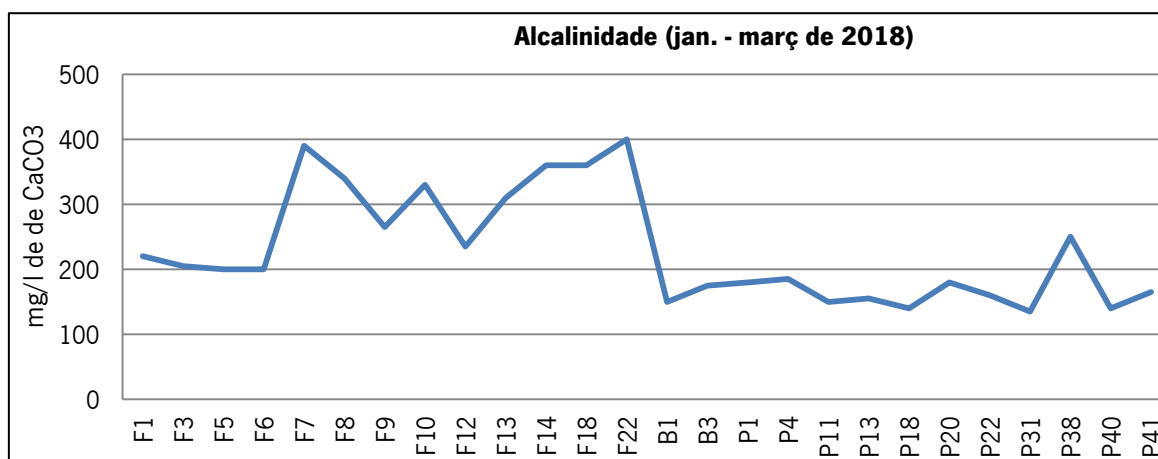


Figura 4.10: Variação da alcalinidade das águas do Vale de Nhartanda.

Nas águas subterrâneas, para além do CO_2 atmosférico, a atmosfera do solo e os gases presentes na zona não saturada constituem importantes contributos para a alcalinidade (LIMA, 2010). Nas águas subterrâneas do Vale de Nhartanda, as águas mais alcalinas são observadas nos furos, com valores que oscilam entre 150 mg/L e 400 mg/L de CaCO_3 (B₁ e F₂₂; Fig. 4.10), e um valor médio de 276 mg/L de CaCO_3 . A água dos poços são menos alcalinas, com valores inferiores, variando entre 135 mg/L e 250 mg/L de CaCO_3 (P₃₁ e P₃₈; Fig. 4.10) e com um valor médio de 167.3 mg/L de CaCO_3 .

De acordo com os resultados obtidos, estão enquadrados no intervalo de alcalinidade da maioria das águas naturais (entre 30 e 500 mg/L de CaCO_3) (MORAES, 2008). Estes valores podem estar relacionados com a profundidade do nível freático associada aos valores de pH (7.21 e 7.61), bem como, a processo de decomposição da matéria orgânica e da taxa de respiração dos microorganismos.

- **Dureza Total**

A dureza total refere-se à capacidade de água neutralizar o sabão e pode ser expressa como dureza temporária, permanente e total (FEITOSA & FILHO, 2000). Os principais cátions associados à dureza de uma água são o íon cálcio e magnésio (Ca^{+2} , Mg^{+2}) e, em menor escala, o ferro (Fe^{+2}), manganês (Mn^{+2}), estrôncio (Sr^{+2}) e alumínio (Al^{+3}) (LIMA, 2010). A dureza da água é classificada de acordo com a quantidade de CaCO_3 mg/L, variando de acordo com alguns autores (Tabela. 4.7).

Tabela 4.7: Classificação da dureza da água.

Água	mg/L de CaCO_3		
	DURFOR & BECKER (1962)	CUSTÓDIO & LLAMAS (1983)	ZUEANE (1996)
Branda	< 60	0 – 50	< 50
Moderadamente Dura	61 -120	50 - 100	50 – 150
Dura	121 – 180	100 - 200	150 – 300
Muito Dura	> 180	> 200	> 300

A água do sistema aquífero do Vale de Nhartanda apresenta uma dureza total com valores entre 105 a 320 mg/L de CaCO_3 , sendo classificada como uma água moderadamente dura, dura e muito dura. Entre janeiro e março de 2018, foram observados os valores médios de 207 mg/L de CaCO_3 e de 192.3 mg/L de CaCO_3 para a dureza total dos furos e poços, respetivamente. Contudo, não se regista uma variação muito significativa entre a dureza das águas dos poços e dos furos (Fig. 4.11).

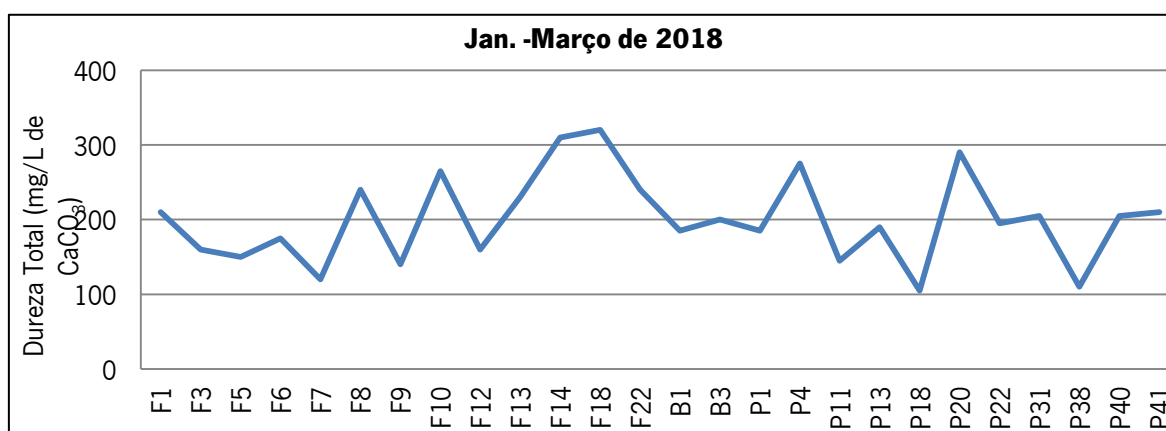


Figura 4.11: Variação da dureza das águas do Vale de Nhartanda.

Os resultados de dureza total (temporária + permanente) estarão relacionados com a mistura de água salobra proveniente da escorrência a partir de materiais areníticos.

- **Salinidade**

A salinidade mede a quantidade de sais dissolvidos nas águas dos reservatórios e é controlada pelo (i) balanço entre a evaporação e a precipitação, que aumenta e diminui a concentração de sais na água, respectivamente e (ii) grau de mistura entre as águas superficiais e subterrâneas.

Uma água é considerada salgada quando tem 30% - 50% de sais e é doce quando tem menos de 0.5% de sais. O termo “água salobra” é aplicado quando a quantidade de sais dissolvidos está situada no intervalo entre 0.5% e 30%. Acima dos 50% é denominada por salmouras (NAEIMI & ZEHTABIAN, 2011).

A água subterrânea do Vale de Nhartanda é considerada maioritariamente como sendo salobra (Figs. 4.12 & 4.13). A água nos poços apresenta uma salinidade variando entre 0.2% (P_{41}) e 1.2% (P_{20}) (Fig. 4.13), provavelmente associado à sua localização geográfica no Vale de Nhartanda.

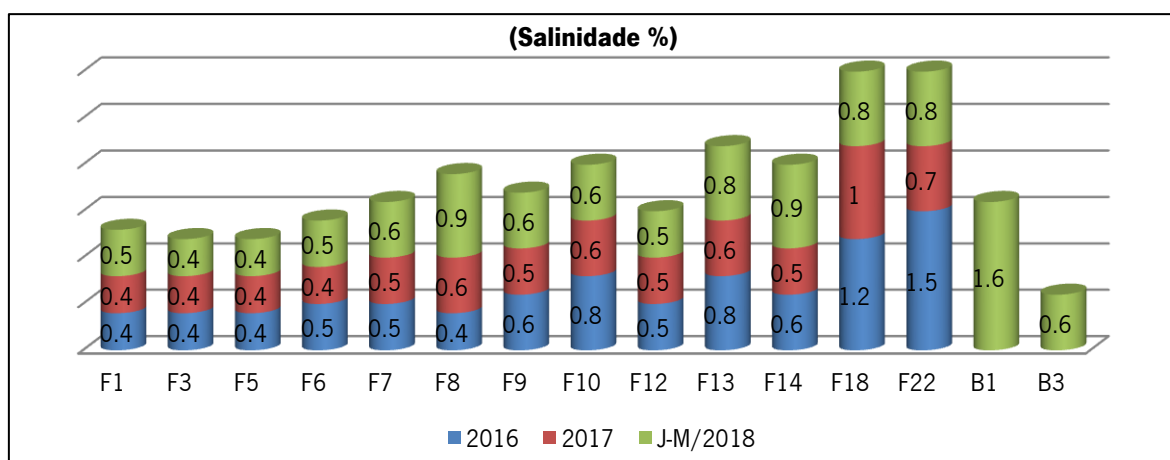


Figura 4.12: Variação da salinidade média anual das águas dos furos do Vale de Nhartanda (FIPAG, 2018).

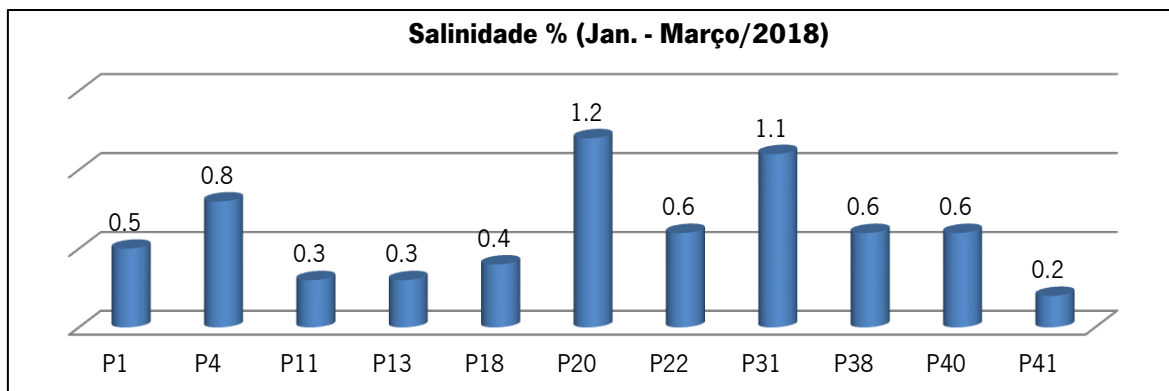


Figura 4.13: Variação da salinidade média das águas dos poços do Vale de Nhartanda.

A salinidade varia no sentido N-S, com elevados teores na região Central do Vale. Os elevados valores de salinidade da água podem estar relacionados com a interação água do Vale – água dos arenitos. Outros fatores como a dissolução de halite, dolomite e gesso, a sobreexploração, o crescimento desordenado do número de poços pode provocar significativos rebaixamentos do nível de água e permitir o avanço da cunha salina (avanço da água do mar). Estes fatores associados aos elevados valores de temperatura ao longo do ano (provocando a evaporação da água e concentrações de sais), podem contribuir para a elevada salinidade.

- **Cloreto e Cálcio**

O cloreto e o cálcio são elementos químicos não encontrados no estado nativo na natureza e são abundantes nas rochas da crosta terrestre, principalmente em rochas sedimentares. Os cloretos encontram-se na natureza geralmente na forma de sais de sódio (NaCl), de potássio (KCl) e de cálcio (CaCl_2) e fazem parte da composição química da precipitação atmosférica, estando a maior quantidade destes presente nos oceanos. O cálcio ocorre sob a forma de carbonatos como calcite (CaCO_3), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CaCO}_3)_2$), gesso $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, anidrite (CaSO_4) e fluorite (CaF_2), este último mais raramente (LIMA, 2010; FUNASA, 2014).

Dada a sua abundância em diversos tipos de rochas e a presença de cloretos na composição química da precipitação, torna estes elementos químicos abundantes nas águas subterrâneas. As águas subterrâneas do Vale de Nhartanda são cloretadas, com teores de Cl que variam entre 120-475 mg/L, ultrapassando o VMA (250 mg/L) para este elemento químico em diversas amostras analisadas (excepto B₁, P₄, P₁₁, P₁₃, P₁₈, P₂₀, P₃₁, P₃₈, P₄₀ e P₄₁). De um modo geral, as águas dos furos apresentam teores mais elevados de cloretos (210 - 475 mg/L) do que as águas dos poços (120-350 mg/L; Fig. 4.14).

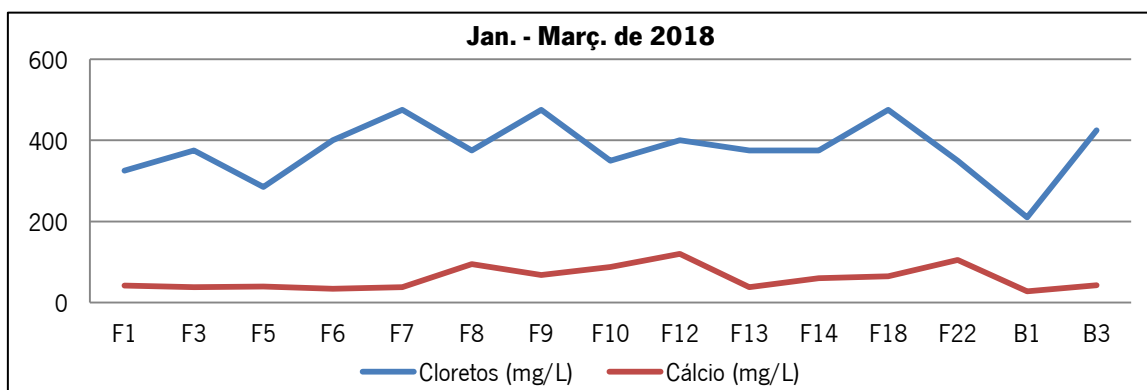


Figura 4.14: Variação dos teores de cloretos e cálcio das águas de furos do Vale de Nhartanda.

No geral, o teor em cálcio varia entre 20-120 mg/L, sendo 28-120 mg/L nos furos e 20-66 mg/L nos poços. (Figs. 4. 14 & 4.15). Em furos (F₈, F₉, F₁₀, F₁₂, F₁₄, F₁₈ e F₂₂) e em poços (P₁₃, P₂₂, P₃₁, P₃₈, P₄₀ e P₄₁), apresentam teores acima dos VMA definidos pela MISAU que é de 50mg/L.

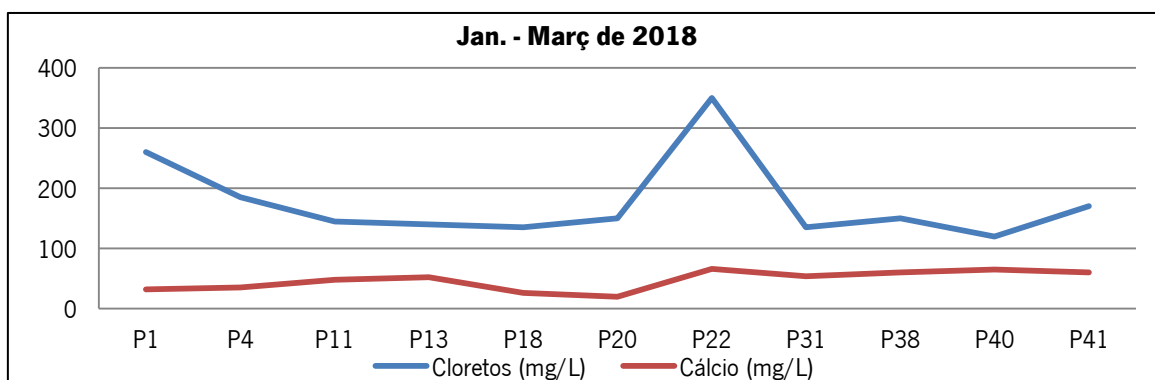


Figura 4.15: Variação dos teores de cloretos e cálcio das águas de poços do vale de Nhartanda.

A presença destes iões no sistema aquífero do Vale de Nhartanda advém da dissolução de minerais como a calcite, dolomite, gesso (cálcio). A intrusão da água do mar e da influência dos esgotos e/ou resíduos domésticos (potencial foco de poluição) que ocorrem na área de estudo e adjacentes contribuem para a ocorrência dos cloretos. Estes fatores, aliados a elevada temperatura, condicionam a maior concentração destes iões, por evaporação da água.

- **Ferro Total e Manganês**

Os catiões ferro e manganês são elementos metálicos abundantes na natureza que através da infiltração da água, pelo solo e rochas, são dissolvidos e passam a fazer parte da água

subterrânea, em maiores concentrações comparativamente com a água superficial. Nos arenitos, os óxidos, carbonatos e hidróxidos de ferro constituem muitas vezes o material de cimentação (FEITOSA & FILHO, 2010).

Nas águas subterrâneas do Vale de Nhartanda, os teores de Fe ultrapassam largamente os teores de Mn, tanto nos furos como nos poços (Fig. 4.16 & 4.17).

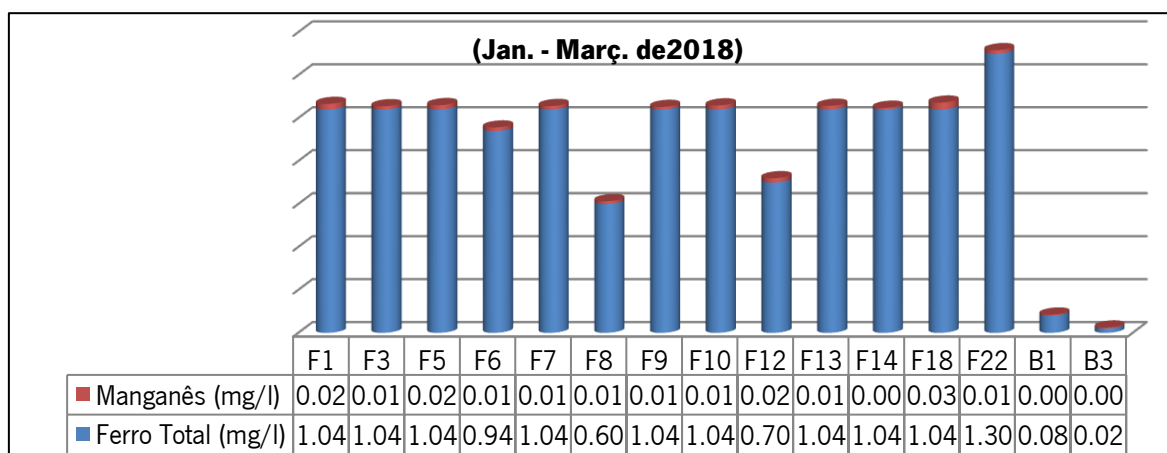


Figura 4.16: Variação dos teores de Ferro Total e Manganês nas águas dos furos do Vale de Nhartanda.

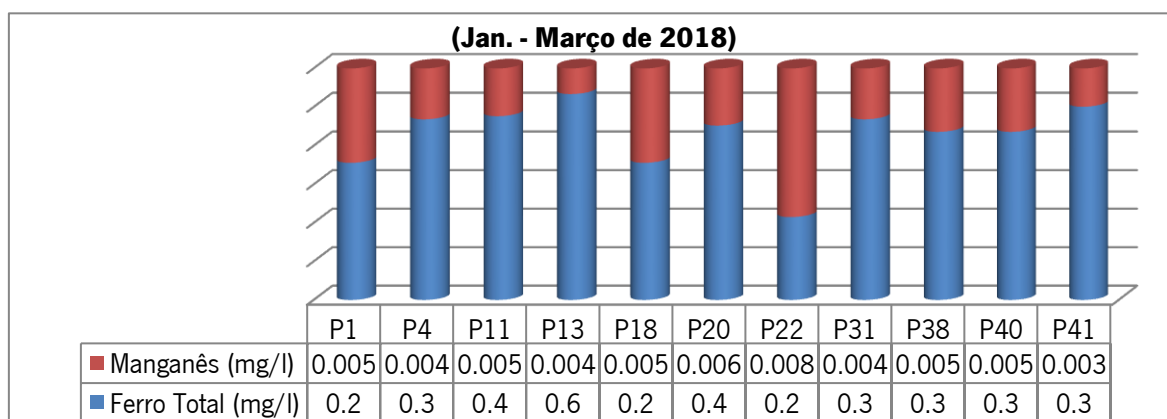


Figura 4.17: Variação dos teores de Ferro Total e Manganês nas águas dos poços do Vale de Nhartanda.

Na maioria das águas subterrâneas do Vale de Nhartanda, o teor de ferro total encontram-se acima do VMA (0.3 mg/L) excepto na águas de B₁, B₃, P₁, P₄, P₁₈, P₂₂, P₃₁, P₃₈, P₄₀ e P₄₁ (Figs. 4.16 & 4.17). Os valores de ferro total mais elevado são encontrados na água dos furos e acredita-se que podem ser superiores a 1.04 mg/L. Os teores de manganês, por sua vez, não ultrapassam os VMA (0.1 mg/L) definidos para este catião.

As elevadas concentrações de ferro na água subterrânea do Vale de Nhartanda podem estar associadas a diversos fatores, nomeadamente: (i) tempo de residência da água em furos interrompidos ou obstruídos; (ii) natureza e cuidados com as máquinas e acessórios, bem como,

introdução de ferro-bactérias durante a perfuração; (iii) obsolescência e/ou falta de higienização nos materiais constituintes dos furos.

Segundo WHO (2011), o ferro promove também o crescimento de “bactérias de ferro”, que resultam da oxidação do ferro ferroso para ferro férrico e, no processo, depositam uma camada viscosa nas condutas de água. No entanto, a inexistência de informação relativa a análises específicas para identificação de colónias de ferro-bactérias, não foi possível avaliar a verdadeira contribuição destas bactérias para a precipitação de ferro nas águas subterrâneas do Vale de Nhartanda.

- **Nitratos, Nitritos e Amónia.**

A atmosfera terrestre é rica em nitrogénio (N_2), contendo cerca de 78,084% deste elemento na troposfera, cuja concentração tem-se mantido constante (TORRES & MACHADO, 2008). Na atmosfera, hidrosfera e biosfera, o nitrogénio pode apresentar-se em diferentes estados de oxidação sob a forma de: nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) e amónia (NH_4^+), envolvidos nos processos de fixação, nitrificação e desnitrificação microbiana. Estes constituem as espécies essenciais de ocorrência de azoto nas águas (LIMA, 2010).

As figuras 4.18 & 4.19 mostram a concentração destes compostos de azoto nas águas subterrâneas do sistema aquífero do Vale de Nhartanda. O ião nitrato constitui a espécie azotada dominante nas águas subterrâneas, tanto de furos como de poços, com teores entre 21.0 e 71.9 mg/L de NO_3^- , e semelhante intervalo de variação.

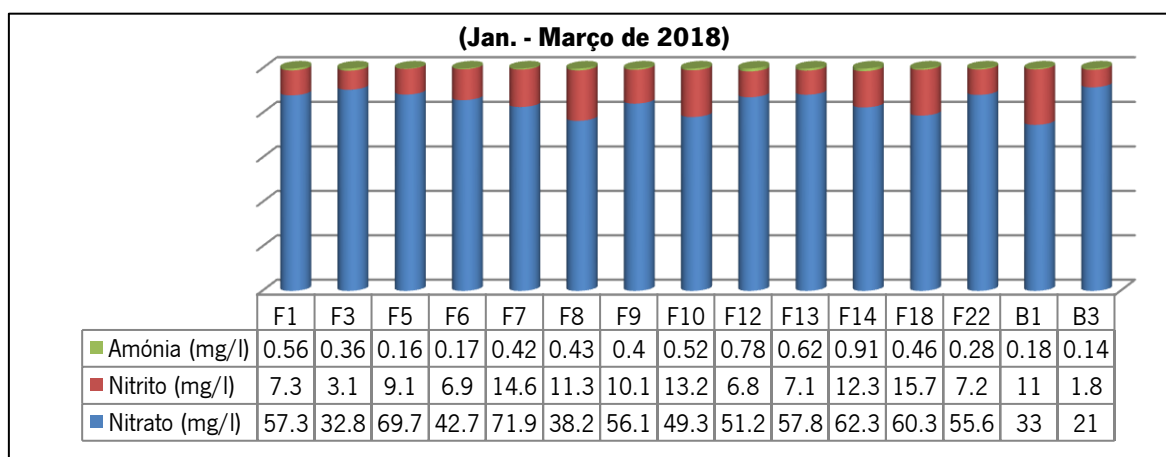


Figura 4.18: Variação das espécies essenciais de azoto na água dos furos do Vale de Nhartanda.

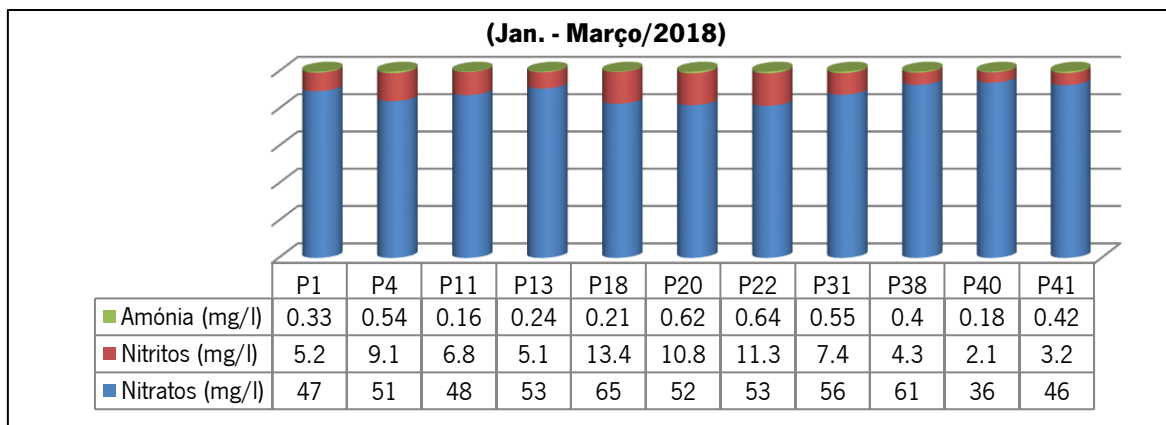


Figura 4.19: Variação das espécies essenciais de azoto na água dos poços do Vale de Nhartanda.

Com excepção da água dos furos F_3 , F_6 , F_8 , F_{10} , B_1 e B_3 , bem como, da água dos poços P_1 , P_{11} , P_{40} e P_{41} , os teores de NO_3^- nas águas subterrâneas do Vale de Nhartanda são superiores ao VMA que é 50 mg/L. Estes elevados teores estão fortemente associados ao processo de lixiviação, a partir dos solos com fertilizantes e adubos aplicados nas atividades agro-pecuária e também aos efluentes urbanos e excreções humanas. Para QUEIROZ (2004), outra fonte de nitratos pode ser a libertação a partir de efluentes de plantas de tratamento biológico nitrificante, que podem conter até 30 mg/L NO_3^- de N.

Os teores de ião amónia das águas subterrâneas do Vale de Nhartanda variam entre 0.14 e 0.91 mg/L NH_3 , sendo inferior ao VMA (VMA=1.5 mg/L).

Os teores de nitrito, por sua vez, estão relacionados com os teores de nitratos nas águas, e apresentam teores entre 1.8 e 15.7 mg/L, nas águas dos furos e dos poços do Vale de Nhartanda (Figs. 4.18 & 4.19). Tanto nos furos como nos poços, o teor de NO_2^- ultrapassa o VMA (0.3 mg/L NO_2^-), indicando graves problemas de poluição no Vale de Nhartanda.

4.3.2. Parâmetros biológicos

Os parâmetros biológicos da água resultam da relação entre os organismos aquáticos e o meio em que ocorrem e permitem a detecção de potenciais poluentes não identificáveis através das características físico-químicas e organolépticas das águas.

A água potável não pode conter microorganismos patogénicos e deve estar isenta de bactérias indicadoras de contaminação fecal, possível de avaliar através da presença de coliformes (pela facilidade de detectar e quantificar), em que a bactéria *Escherichia coli* é um dos principais indicadores (FUNASA, 2006).

A detecção e quantificação de todos os micro-organismos patogénicos potencialmente presentes na água é árduo, com dispêndio de tempo e oneroso, pois envolve a preparação de diferentes meios de cultura e nem sempre se obtém resultados positivos ou que confirmem a presença dos micro-organismos. Estas dificuldades resultam do facto de determinados organismos serem intolerantes enquanto que outros são tolerantes, dependendo da sua capacidade de sobreviver em novas condições ambientais (FUNASA, 2014).

Assim sendo, para as águas subterrâneas do Vale de Nhartanda foram seleccionados organismos mais facilmente identificáveis, cuja ocorrência na água está correlacionada com a presença de organismos patogénicos – denominados organismos indicadores, como é o caso da bactéria *Escherichia coli* e coliformes totais. Igualmente foi efectuada a contagem bacteriana (Figs. 4.20 & 4.21).

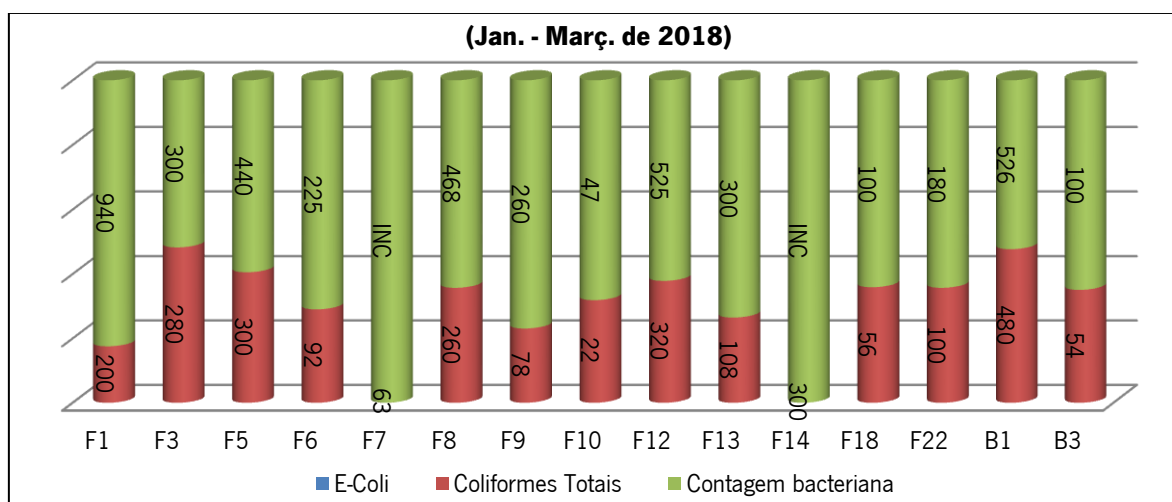


Figura 4.20: Variação da *E-Coli*, Coliformes totais e Contagem bacteriana na água dos furos do Vale de Nhartanda.

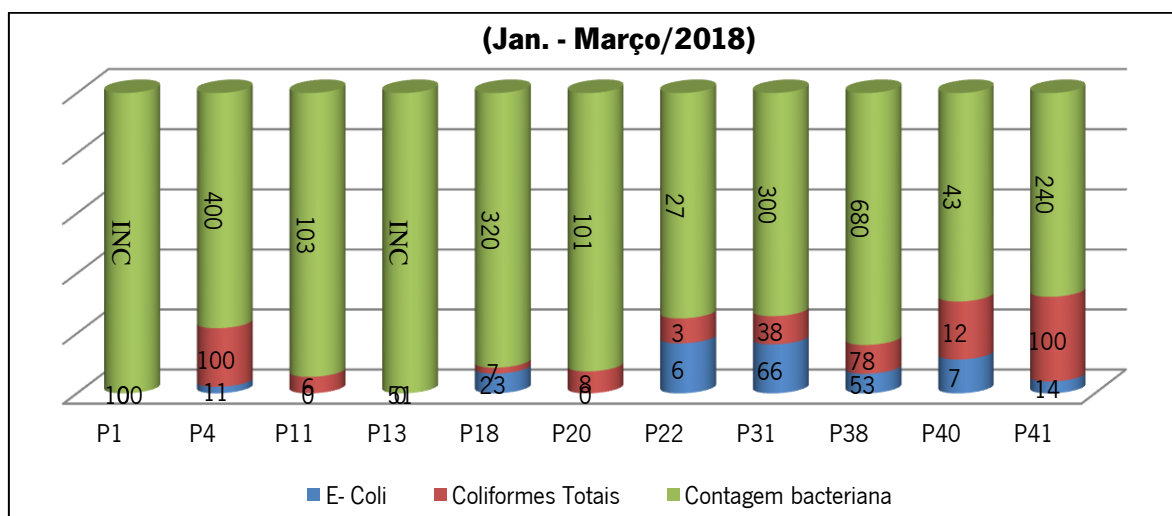


Figura 4.21: Variação da *E-Coli*, Coliformes totais e Contagem bacteriana na água dos poços do Vale de Nhartanda.

A fig. 4.20 mostra que as águas subterrâneas do Vale de Nhartanda contém bactérias cuja quantidade e natureza varia consideravelmente com o local e as condições ambientais.

O MISAU recomenda uma ausência total destes parâmetros para a água destinada ao consumo humano, tanto para sistemas privados assim como destinados ao abastecimento público (BR, 2004).

Os furos estão isentos de *E-Coli*, ao contrário dos poços (excepto P₁, P₁₁, P₁₃ e P₂₀) que apresenta quantidades que variam de 6 (P₂₂) à 66 (P₃₁). Os coliformes totais ocorrem tanto na água dos furos como dos poços, com maiores quantidades nestes últimos. Exceptuando a água dos furos F₆, F₇, F₉, F₁₀, F₁₈, B₃, P₁₁, P₁₃, P₁₈, P₂₀, P₂₂, P₃₁, P₃₈ e P₄₀, os restantes pontos de amostragem apresentam quantidades superiores a 100 UFC de coliformes totais (Fig. 4.20 & 4.21). Estes valores indicam que a água pode estar contaminada.

De referir que, os micro-organismos presentes nas águas naturais são, na sua maioria, inofensivos à saúde humana. Porém, na contaminação através de esgotos sanitários estão presentes micro-organismos (vírus, bactérias, protozoários e helmintos) que poderão ser prejudiciais à saúde humana (FUNASA, 2014).

Os coliformes totais podem ser encontrados no solo, águas naturais e residuais domésticas e no intestino do Homem e de outros animais de sangue quente e são eliminados através das fezes em quantidades elevadas (106/g – 108/g) (OMS, 1995). A falta de saneamento básico e as actividades humanas realizadas no Vale de Nhartanda permitem justificar a contaminação biológica desta área. Segundo a OMS (1995), em climas tropicais apresentam uma elevada capacidade de se multiplicar na água.

A concentração total de micro-organismo é maior na água dos poços comparativamente com a água dos furos e tende a concentrar-se junto a áreas de ocupação humana e agrícolas. Este facto está relacionado com a contaminação por esgotos sanitários, resíduos e prática de fecalismo a céu aberto. A pastagem de gado e a aplicação de fertilizantes orgânicos (devido ao baixo custo de aquisição e produção) também contribuem para a ocorrência destes organismos nas águas subterrâneas do Vale de Nhartanda. Particularmente para a água dos poços, esta situação pode ainda estar relacionada com a exposição dos mesmos, uma vez que não apresentam nenhuma protecção do meio envolvente.

Os resultados indicam claramente que de todos os dezoito parâmetros analisados, apenas cinco/seis se encontram dentro dos VMA (cor, T° C, manganês, pH, alcalinidade e dureza total) definidos pelo MISAU e os restantes 66.7% ou 76.5 (se considerar a data da análise da cor)

apresentam, por vezes, valores não admissíveis, apontando que o sistema aquífero do Vale de Nhartanda pode estar contaminado, e apresentando elevados níveis de vulnerabilidades cuja descrição segue-se.

4.4. Vulnerabilidade do sistema aquífero do Vale de Nhartanda

4.4.1. Método GOD

O índice de vulnerabilidade à contaminação mediante a aplicação do método GOD variou de Média a Alta, com predomínio desta última classe. Com o intuito de permitir uma avaliação mais detalhada, estas classes foram subdivididas em subclasses (i) moderada-média para P_{40} e (ii) moderada-alta para P_{20} e P_{31} e mediana-alta para P_1 , P_4 , P_{11} , P_{13} , P_{18} , P_{22} , P_{38} e P_{41} . Observa-se que 9.1% da "região estudada" apresenta como áreas de vulnerabilidade média e 90.9% de vulnerabilidade alta (Fig. 2.22). Desta última, 20% é moderadamente alta e 80% medianamente alta.

Tabela 4.8: Índice de vulnerabilidade para os poços do Vale de Nhartanda

Poços	G	O	D	Vulnerabilidade do Aquífero à Contaminação	
				Σ	Classe de Vulnerabilidade
P_1	1.0	0.7	0.9	0.63	Alta
P_4			0.9	0.63	Alta
P_{11}			0.9	0.63	Alta
P_{13}			0.9	0.63	Alta
P_{18}			0.9	0.63	Alta
P_{20}			0.8	0.56	Alta
P_{22}			0.9	0.63	Alta
P_{31}			0.8	0.56	Alta
P_{38}			0.9	0.63	Alta
P_{40}	0.4	0.7	0.9	0.3	Média
P_{41}	1.0		0.9	0.63	Alta

As áreas de vulnerabilidade moderada-média ocorrem na região noroeste do Vale de Nhartanda que apesar de se localizar na área de ocupação humana, a densidade populacional é baixa. Esta situação coincide com uma zona de menor número de fontes de poluição. Estes locais caracterizam-se pela ocorrência de arenitos e altitudes que variam de entre 129-130m (Fig.3.4) embora, o nível do lençol freático seja inferior a 5m como em todos outros poços (excepto P_{31} com

5.74m). As áreas de vulnerabilidade alta (moderada e mediana-alta) ocorrem em zonas de recargas e na parte central do Vale de Nhartanda com altitudes que variam de 125 - 128 (Fig.3.4), sobre solos aluvionares e níveis freáticos que variam de 2.5m a 5m (excepto P₂₀ com 5.2m).

Com excepção do P₄₀ em que o parâmetro distância até ao lençol freático (D) apresentou maior influência na determinação da vulnerabilidade, nos restantes poços os parâmetros profundidade do nível de água (D) e Grau de Confinamento (G) foram os determinantes no resultado final (Tabela 4.8).

4.4.2. Método DRASTIC

Para a avaliação da vulnerabilidade natural à poluição e/ou contaminação do sistema aquífero do Vale de Nhartanda, seguiu-se a cada passo proposto pelo método de trabalho com a definição dos valores de cada parâmetro utilizado no cálculo do índice DRASTIC.

Os valores para cada parâmetro foram definidos, segundo os dados preexistentes de furos destinados ao abastecimento de água da Cidade de Tete "antiga".

- **Profundidade do Lençol Freático (D)**

A profundidade da água é muito importante porque determina a distância na vertical e/ou perpendicular que através da qual um contaminante deve percorrer até atingir o aquífero, e pode ajudar a determinar o tempo de contato com o meio circundante (ALLER *et al.*, 1987).

A profundidade do lençol freático foi obtida através de informações cedidas pela FIPAG e DPOPHRH, com a determinação dos níveis da água dos respetivos furos durante a perfuração. Os valores de profundidades dos níveis estático (N.E.) e dinâmico (N.D.) de água variaram de 4.8m a 7.7m e de 9.2m a 19m, respetivamente (Tabela 4.9).

Tabela 4.9: Profundidade do nível freático nos furos do Vale de Nhartanda (FIPAG e DPOPHRH, 2018).

Furo	F ₁	F ₃	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₈	F ₂₂	B ₁	B ₃
N.E.	7.2	6.4	7.3	6.0	6.0	6.8	6.7	7.7	6.7	6.8	7.6	6.0	5.4	7.3	4.8
N.D.	15.7	13.2	11.4	19	18.5	10	13.3	11	11.2	11.3	9.2	8.9	9.9	14.8	9.2

A baixa profundidade da água verificada no sistema aquífero do Vale de Nhartanda propicia a oxidação pelo oxigénio atmosférico, sendo por isso, suscetível à poluição da água subterrânea. Em geral, há uma maior probabilidade de atenuação da contaminação à medida que

a profundidade da água aumenta, uma vez que níveis muito profundos de água implicam mais tempos para que os contaminantes atinjam aos aquíferos. Estes furos apresentam uma profundidade que varia entre 27m - 48m, funcionando 24h/dia excepto os furos F₁₈, F₂₂ (18h e 19h), B₁ e B₃ (apenas no período diurno e com interrupções).

- **Recarga (R)**

A precipitação constitui a principal fonte de recarga de água subterrânea. A recarga aquífera pode ocorrer diretamente, quando da quantidade de precipitação que se infiltra através da superfície do solo e atinge o lençol freático, ou indiretamente, através da precipitação que alimenta bacias hidrográficas arréicas.

Estima-se que a recarga no sistema aquífero do Vale de Nhartanda ocorra pela infiltração a partir de enxurradas (~4%), pela precipitação e das colinas (~12%) e através do rio Zambeze (~84%) (WE CONSULT, 2016). Estas fontes de recarga são responsáveis pelo transporte (horizontal e verticalmente) de contaminantes (sólidos ou líquidos), lixiviados para e no interior do aquífero. Esta recarga pode variar ao longo do tempo em função do caudal do rio Zambeze e da precipitação.

ALLER *et al.*, (1987), consideram que a recarga também controla a quantidade de água disponível para dispersão e diluição do contaminante na zona vadosa e saturada. Desta feita, quanto maior a recarga, maior o potencial de poluição da água subterrânea desde que a recarga seja suficiente para causar a diluição do contaminante.

Os dados referentes à recarga diária foram obtidos a partir do trabalho de We Consult e Ara Zambeze. Com base nesses estudos, a recarga anual no sistema aquífero do Vale de Nhartanda é de aproximadamente 6 000 000 m³/ano (Fig. 4.22).

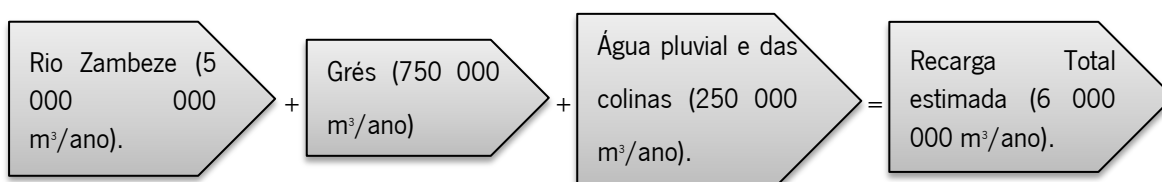


Figura 4.22: Recarga anual no Vale de Nhartanda (adaptado de WE CONSULT, 2016).

Essa situação indica que diariamente o sistema aquífero do Vale de Nhartanda tem uma recarga de aproximadamente 16 393.4 m³ de água equivalente, portanto acima dos 255 mm.

- **Característica do Aquífero (A)**

A característica do aquífero baseia-se, sobretudo nas propriedades relacionadas com a densidade de fraturas e na permeabilidade intrínseca do solo. Quanto maior for a sua abundância, maior será o grau de vulnerabilidade para o aquífero.

O sistema aquífero do Vale de Nhartanda é constituído por solo aluvionar resultante entre outras causas, do transporte de grandes quantidades de detritos, através de correntes superficiais, sendo essencialmente livre, sem evidências de fracturação (Anexo 4.5).

- **Tipo de Solos (S)**

O solo sendo a zona superior da terra com uma profundidade máxima de cerca de 2m ou menos a partir da superfície (ALLER *et al.*, 1987), não apenas influencia na recarga do aquífero por infiltração, mas também, da migração vertical de contaminantes para a zona vadosa e para a superfície freática (ALLER *et al.*, 1987).

Como foi dito anteriormente (CAP. III), na área de estudo predominam solos aluvionares com, textura arenoso-argilosa e argilosa (Anexo 4.5) provenientes do material extravasado do rio Zambeze, aquando das inundações. Esta predominância de argila contribui para um baixo potencial de contaminação para o sistema aquífero do Vale de Nhartanda, uma vez que a presença de partículas menores existentes em solos argilosos, retarda o deslocamento vertical do contaminante devido à diminuição do tamanho dos poros no meio e, conseqüentemente, aumentando a capacidade de retenção da zona não saturada permitindo, dessa forma, uma maior atenuação natural.

- **Topografia (T)**

O declive controla a probabilidade de um poluente escorrer ou permanecer na superfície ao longo de um intervalo de tempo suficiente para se infiltrar. No sistema aquífero do Vale de Nhartanda, a variação de declive é pouco significativa, isto é, aplanada e praticamente nula com altitudes que variam entre 125-130m (5m). Com excepção dos furos F₇ (125m), F₈ (128m), F₁₂ (127m), F₁₈ e F₂₀ (130m) e B₃ (129m), os restantes furos encontram-se a altitudes de 126m (Fig. 3.4).

Estas altitudes são inferiores às existentes nas áreas adjacentes. Assim, as regiões Leste e Oeste são áreas preferenciais de convergência dos contaminantes em direcção ao Vale de Nhartanda, aumentando o potencial de poluição das águas subterrâneas.

A topografia também é decisiva no processo de formação dos solos. Esta exerce uma direta influência na atuação dos agentes responsáveis pelo intemperismo, como a água e os ventos. Em áreas mais íngremes, a infiltração da água é menor, provocando menor ação do intemperismo e uma remoção maior dos sedimentos na superfície, formando solos mais rasos. E em áreas mais baixas, a acumulação de água é maior, provocando uma maior ação intempérica e, por outro lado, dificultando a drenagem, ocasionando solos mais orgânicos. Para ALLER *et al.*, (1987), a topografia também é significativa porque o gradiente e a direção do fluxo geralmente são inferidos para a superfície freática, a partir da inclinação geral do solo. Tipicamente, encostas íngremes apresentam uma maior velocidade de água no solo.

- **Impacto da Zona Não Saturada (I)**

A zona vadosa refere-se à área acima da superfície freática, não insaturada ou saturada de forma descontínua. O meio da zona vadosa determina as características de atenuação natural dos contaminantes abaixo do horizonte de solo típico e acima da superfície freática. Os processos de biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reação química, volatilização e dispersão podem ocorrer dentro da zona vadosa. A capacidade de biodegradação e volatilização diminui com o aumento da profundidade, sendo fortemente influenciada pela presença de fracturas. Os materiais no topo da zona vadosa também exercem influência no desenvolvimento do solo (ALLER *et al.*, (1987). No geral, a análise dos perfis das amostras extraídas nos poços de monitorização permitiu a identificação, na zona não saturada da área de estudo, da presença de solo de alteração com textura predominante de areia fina, traços de argila e de silte (até 4/5 m). Com o aumento da profundidade foi possível constatar a presença de horizontes com uma granulometria de areia fina e média (4 - 22m).

- **Condutividade Hidráulica (C)**

A facilidade com que a água circula no aquífero é de extrema importância na determinação da sua produtividade e vulnerabilidade, pois, a velocidade com que a água subterrânea flui, influencia na recarga e no potencial de poluição de um aquífero. A porosidade, as fraturas e os estratos dos aquíferos, bem como, o tamanho, arranjo e forma das partículas, associados à temperatura e viscosidade da água, constituem os fatores que influenciam na condutividade hidráulica. No sistema aquífero do Vale de Nhartanda, a condutividade hidráulica é superior a 86 m/dia (We Consult, 2016).

4.4.2.1. Índice de vulnerabilidade (DRASTIC)

De acordo com o método DRASTIC, a vulnerabilidade do sistema aquífero do Vale de Nhartanda varia de Alta (F₅, F₈, F₁₀, F₁₂, F₁₃ e F₁₄) a Muito Alta (F₁, F₃, F₆, F₇, F₉, F₁₈, F₂₂, B₁ e B₃) (Fig. 4.10).

Tabela 4.10: Índice de vulnerabilidade DRASTIC para os furos do Vale de Nhartanda.

	D	R	A	S	T	I	C	Σ	Índice
F1	7*5	9*4	3*8	9*2	9*1	5*6	10*3	182	MA
F3	9*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	188	MA
F5	7*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	178	A
F6	9*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	188	MA
F7	9*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	188	MA
F8	7*5	9*4	3*8	7*2	10*1	5*6	10*3	179	A
F9	9*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	188	MA
F10	7*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	178	A
F12	7*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	178	A
F13	7*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	178	A
F14	7*5	9*4	3*8	7*2	9*1	5*6	10*3	178	A
F18	9*5	9*4	3*8	10*2	10*1	5*6	10*3	195	MA
F22	9*5	9*4	3*8	10*2	10*1	5*6	10*3	195	MA
B1	9*5	9*4	3*9	9*2	9*1	5*6	10*3	195	MA
B3	9*5	9*4	3*7	7*2	10*1	5*6	10*3	196	MA

***MA** – muito alta; **A** – alta.

A vulnerabilidade alta (40%) e muito alta (60%) verificada em furos do sistema aquífero do Vale de Nhartanda é fortemente influenciada pelos parâmetros **D, R, A, T e C**, sendo este último o mais determinante. Ao considerar, por exemplo, uma época muito chuvosa, o índice de vulnerabilidade chega a atingir níveis extremos, devido às inundações, promovendo um contacto direto entre a água subterrânea e superficial.

CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados obtidos pela aplicação dos métodos GOD e DRASTIC são eficientes na estimativa dos índices de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. No entanto, são restringidos por seu aspecto qualitativo e pela subjetividade.

Contudo, são importantes ferramentas a serem utilizadas especialmente pela administração pública, a fim de assessorar na tomada de decisão quanto ao tipo de empreendimento ou atividades possíveis de implantar numa determinada região, ou ainda indicar locais preferenciais para desenvolvimento de certas atividades.

Dada a uniformidade das características do Vale de Nhartanda, a distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade GOD e DRASTIC mostra-se praticamente homogênea. Com o método GOD, a maior parte da área apresenta um índice de 0.63, correspondendo a alta vulnerabilidade da área. O método DRASTIC é qualitativo e define para o sistema aquífero do Vale de Nhartanda uma vulnerabilidade Alta e Muito Alta, com um índice de vulnerabilidade que varia entre 178-196.

Os índices de vulnerabilidade determinados pelos dois métodos (GOD e DRASTIC) demonstram claramente que o sistema aquífero do Vale de Nhartanda é caracterizado por apresentar uma vulnerabilidade Alta a Muito Alta. De salientar que, por vezes, pode atingir um índice extremo, por exemplo, na época quente e húmida, período em que parte do vale fica inundada e que a relação de trocas água superficial – água subterrânea ocorre praticamente sem nenhum impedimento.

Comparando os resultados obtidos pelos métodos GOD e DRASTIC, pode distinguir-se claramente o grau de detalhe associado a cada um dos métodos. Enquanto que o primeiro considera a avaliação de três parâmetros, o segundo avalia sete parâmetros, sendo uma análise mais detalhada, visto que quanto maior for o conhecimento da área estudada, melhor será a previsão do comportamento do subsolo face a possíveis fontes contaminantes. Apesar das duas metodologias apresentarem classificações com pequenas distinções na área de estudo, as duas tabelas revelam resultados semelhantes – Vulnerabilidade **alta a Muito Alta** - para praticamente toda a área do sistema aquífero do Vale de Nhartanda.

Neste sentido, é possível afirmar que o método GOD promove uma análise preliminar na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Representa uma análise mais simples e sistemática, que pode fornecer resultados satisfatórios quando há exiguidade de dados disponíveis, embora haja possíveis margens de erro por não considerar outros importantes parâmetros na sua avaliação. Contudo, é indicada a aplicação do método DRASTIC sempre que existem dados

suficientes, devido à possibilidade de elaborar modelos mais precisos a partir de informações mais detalhadas do meio avaliado.

Os resultados obtidos pelos métodos GOD e DRASTIC, são influenciados pelas características hidrogeológicas do sistema aquífero do Vale de Nhartanda, cuja zona não saturada possui uma espessura variando entre 5-8m nos furos e inferior a 5m em poços, sendo constituída por solo aluvionar com areia, argila e silte, com uma condutividade hidráulica média superior a 86 m/dia. Estas características associadas ao declive praticamente nulo da área favorecem a contaminação da água subterrânea.

A presença de atividades potencialmente contaminantes ao longo do vale e áreas adjacentes, associadas com a poluição do rio Zambeze, a proximidade de fossas, latrinas e a construção inadequada de poços e furos também contribuem para a degradação da qualidade da água. O elevado índice de vulnerabilidade para a maioria dos contaminantes indica que a água é facilmente atingida por bactérias e vírus e outras substâncias, que fazem com que vários parâmetros analisados estejam acima dos VMA, como observado na área em estudo, criando assim um "*Stress* hídrico".

Todos os resultados apresentados no presente trabalho de investigação apontam para a necessidade de implementação de ações visando à proteção da água subterrânea do Vale de Nhartanda e, conseqüentemente, a saúde pública. Neste sentido apresentam-se algumas medidas a serem implementadas pelas Instituições locais e regionais:

a) Município e Obras Públicas

- Interdição da construção de infraestruturas no Vale de Nhartanda;
- Repensar sobre o tipo de agricultura e interditar a prática das atividades agro-pecuárias na zona de recarga do Vale;
- Fomento do projeto de construção de infraestruturas sanitárias robustas e de baixa manutenção para a comunidade adjacente ao Vale de Nhartanda;
- Contrato de gestão com operadores privados para operação e manutenção das unidades de saneamento;
- Construção de banheiro público e alocação de lixeira, permitindo uma redução das atividades de defecação a céu aberto e deposição inadequada dos resíduos que constituem uma das principais causas da poluição da água no Vale de Nhartanda;

- Construção de uma ETAR para as águas residuais da Cidade de Tete que, posteriormente pode servir para a recarga artificial de aquíferos, a partir dos efluentes domésticos tratados;
- Estabelecer padrões de qualidade ambiental, fiscalizando e punindo os poluidores de forma que não compense a reincidência.

b) Ara Zambeze e FIPAG

- Conhecer a disponibilidade dos sistemas aquíferos e a qualidade das águas, sendo primordial ao estabelecimento de políticas de gestão das águas subterrâneas;
- Delimitação dos perímetros de Proteção (Zonas: mediata, intermédia e alargada) nos furos e proteção das áreas de recarga;
- Contratação de privados para operação e manutenção do saneamento em Nhartanda (caso o município se mostre insuficiente/incapaz);
- Construção de bancos de areia em cursos de águas residuais e na borda do Vale de Nhartanda, de modo a reduzir a erosão, e combinação com programas de reflorestação. A ocorrência de mais árvores permitirá a retirada de nitratos e uma diminuição da poluição dos recursos hídricos. Com esta reflorestação será, também, desencorajada a ocorrência de atividades indesejadas de uso da terra, como escavações de argila, construções ilegais, entre outras;
- Colher e analisar periodicamente a qualidade da água nos P₁ (Sul) e P₄₁ (Norte);
- Mapear áreas de risco e recuperar as atingidas, acompanhado do estabelecimento de canais de informação e conscientização para a importância da preservação ambiental, fechando o ciclo de cuidados na preservação dos recursos aquíferos;
- Efetuar o modelo de fluxo de água no Vale de Nhartanda.

c) Residentes de áreas adjacentes e Sociedade Civil

- Conscientização socio-ambiental da sociedade civil e da população da vizinhança, envolvendo-as em todas as atividades de proteção do sistema aquífero do Vale de Nhartanda;
- Se as medidas públicas são importantes, a educação ambiental da população é fundamental, pois qualquer indivíduo que promova o desenvolvimento de focos de poluição ou agressões ambientais deve ser denunciado às autoridades responsáveis.

Outras sugestões, como a orientação de um profissional habilitado em águas subterrâneas na abertura e utilização de poços, contribuem para que o uso da água subterrânea não comprometa o futuro deste recurso, tanto por uma possível contaminação como por sobre-exploração, e não exponha a saúde da população abastecida a possíveis doenças de origem hídrica, devido à utilização de mananciais inadequados ou contaminados.

Isto mostra que é muito importante a compreensão de que as águas subterrâneas não são fontes invulneráveis e inesgotáveis e que sua poluição representa sérios riscos para a existência de vida Humana na Terra. Os procedimentos indicados para a proteção do risco de contaminação da água subterrânea constituem um veículo eficaz para iniciar o envolvimento de todas as partes interessadas e relevantes neste processo, incluindo os usuários da água e potenciais poluidores de águas subterrâneas. Estes fornecem uma base sólida para que sejam cumpridas pelo regulador ambiental e dos recursos hídricos locais, a implementação das medidas necessárias e adequadas de controle da poluição e proteção do aquífero, não esquecendo de que a responsabilidade final pela proteção contra a poluição das águas subterrâneas deve caber à agência relevante do governo nacional ou local.

Bibliografia

1. ADAMS, B.; FOSTER, S. (1992). "Land-surface zoning for groundwater protection." Journal of Institution of Water and Environmental Management. 320p.
2. ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. A.; PETTY, R.; HACKETT, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. [Washington, D.C.]: U.S. Environmental Protection Agency, 643p. (EPA Publication 600/2-87/035).
3. ARTUSO, E; OLIVEIRA, M.M.; LOBO FERREIRA, J.P. (2002). Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution using six different Methods: AVI, GOD, DRASTIC, SI, EPPNA and SINTACS. Application to the Évora Aquifer, LNEC, Rel. 184/02- GIAS, June 2002.
4. AUGÉ, M. (2008). Hidrogeología Ambiental. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad De Buenos Aires, Buenos Aires. 295p.
5. BÓS, M.S; THOMÉ A. (2012). Métodos para avaliar vulnerabilidade de águas subterrâneas, Porto Alegre. 80p, disponível em https://issuu.com/poacomunicacao/docs/m_todos_para_avaliar_a_vulnerabili;
6. CARBONELL, A. (1993). Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Washington DC, National Research Council, National Academy Press.
7. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA – CNA (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado Y Saneamiento - Diseño De Plantas Potabilizadoras Tipo De Tecnología Simplificada. México. 329p.
8. CUSTODIO, E. ; LLAMAS, M.R. (1983). Hidrología subterránea. 2. Ed. Barcelona, Omega, v.2 – 2359p.
9. DUARTE, U. (1980). Geologia ambiental da área de São Pedro: vetor águas subterrâneas. (Tese de Doutorado, IG-USP), disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44131/tde-24092013-161845/pt-br.php>; 86p;
10. DURFOR, C.N.; BECKER, E. (1962). Public water supplies of the 100 largest cities in the United States. U.S Geological Survey water-supply paper 1812, 372p.
11. FEITOSA, F.A. C; FILHO J.M. (2000). Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. 2ed. Brasil. 404p.
12. FETTER, C.W. (2000). Applied Hydrogeology. EUA. 615p.

13. FOSTER S.; GARDUÑO H.; KEMPER K; TUINHOF A.; NANNI M.; DUMARS C. (s/d). Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools - Groundwater Quality Protection defining strategy and setting priorities. Netherlands, 9p.
14. FOSTER S.; HIRATA R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Publication.
15. FOSTER, S. (1987) "Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy." Proceedings of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Noordwijk, Países Baixos.
16. FOSTER, S. S. D. (1987). Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. In: W. van DUIJVENBOODEN and H.G. van WAEGENINGH (eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Proc., Intl. Conf., Noordwijk aan Zee, The Netherlands, March 30–April 3, 1987, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information No. 38. 1170pp.
17. FOSTER, S; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. (2006). Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água. Órgãos Municipais e Agências ambientais, São Paulo, 114p.
18. FUNASA (2006). Manual Prático de Análise de Água. Brasília, 147p.
19. FUNASA (2014). Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS. 1ª ed. Brasília. 116p.
20. HCB (2012). Programa de Supervisão e Controlo dos Níveis da Albufeira no âmbito da Central Norte (Rio Zambeze). Tete. 125p.
21. HIRATA, R.C.A. (2001). Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: I Seminario - Taller: Protección de Acuíferos frente a la contaminación, Toluca, Mexico. Disponível em < <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>>.
22. IRMSA (2015). Impact Of The Failure Of The Kariba Dam, South Africa, 49p.
23. Ji, Zhen-Gang, (2008). Hydrodynamics And Water Quality Modeling Rivers, Lakes, And Estuaries. New Jersey – EUA. 702p.
24. KIRSCH, R. (2006). Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 459p;
25. KOVALEVSKY, V.; KRUSEMAN, G.; RUSHTON, K. (2004). Groundwater studies: an international guide for hydrogeological investigations. 347p.

26. LIMA A. (2010). Composição e Origem das Águas Minerais Naturais – Exemplo de Caldas da Saúde, Portugal, 235p.
27. LOBO, F.J. P (1999). The European Union experience on groundwater vulnerability assessment and mapping. COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter.
28. MAIA, P.H.P.1; CRUZ, M. J. M. (2011). Um Novo Método para Avaliar a Vulnerabilidade dos Aquíferos. Brasil. 12p.
29. MASA (2014). Zoneamento Agroecológico - Resultados do País, excepto Maputo, Moçambique. 46p.
30. MORAES, P.B. (2008). Tratamento Biológico e Físico-Químico de Efluentes Líquidos. Disponível em: < <http://webensino.unicamp.br>.
31. MUCHANGOS, A. (1999). Moçambique, Paisagens e Regiões Naturais, Maputo – Moçambique. 159p.
32. NAEIMI, M.; ZEHTABIAN, G. (2011). The review of saline water in desert management. International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 2, No. 6, December.
33. OMS (1995). Guias para la Calidad del Agua Potable. Vol. 1 – Recomendaciones – Ginebra –Segunda edición.
34. PARRON, L.M.; MUNIZ, D.H.F.; PEREIRA, C.M. (2011). Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Embrapa. Brasil, 70p.
35. PEDROSA, C.A.; CAETANO, F.A. (2002). Águas subterrâneas. Brasília: Agência Nacional de Águas.
36. QUEIROZ, E.T. (2004). Diagnóstico de águas minerais e potáveis de mesa do Brasil. In: Anais, Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, Cuiabá.
37. RIBEIRO, D.; DOLORES, S. (2011). Gestão da Bacia Hidrográfica do Médio e Baixo Zambeze em Períodos Críticos. Maputo – Moçambique. 34p.
38. SCHÖELLER, H. (1962). Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique, Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources. Paris: Masson et Cie, Éditeurs. 642 p.
39. SWRPC, (2002). Groundwater Resources Of Southeastern Wisconsin, Wisconsin Geological And Natural History Survey, 208p.
40. TALTASSE, P. (1972). Mapas da vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Universidade de São Paulo. Publ. Avulsa n. 1.

41. TORRES, F.T.P.; MACHADO, P.J.O. (2008). Introdução À Climatologia, Geographica, Ubá: Ed. 244p.
42. USGS (2016). Tectonic Summaries of Magnitude 7 and Greater Earthquakes from 2000 to 2015, Virginia – EUA, 158p.
43. VOUDOURIS, K; VOUTSA, D. (2012). Water quality monitoring and assessment. Croatia. 614p.
44. VRBA, J; ZAPOROZEC, A. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. IAH International Contributions to Hydrogeology. París. 131p.
45. WATERLOO, M.; POST, J; V., E.A.; HORNER, K. (2016). Introduction to Hydrology and Climate. Amsterdam. 236p.
46. WHO (2003). Total dissolved solids in Drinking-water, Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva 27, Switzerland. 8p.
47. WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality, Malta. 4ed. 564p.
48. ZAPOROZEC, A.; HIRATA, R.; JOHANSSON, O.P.; NONNER, C.J.; ROMIJN, E; WEAVER, C.M.J. (2004). Groundwater contamination inventory - A METHODOLOGICAL GUIDE with a model legend for groundwater contamination inventory and risk maps. París. 162p.
49. ZUANE, J. (1996). Handbook of Drinking Water Quality. 2ed. EUA. 564p.

50. AFONSO R.S. (1978). A geologia de Moçambique - Notícia explicativa da carta geológica de Moçambique, DNGM, Maputo.
51. ARA-ZAMBEZE (2016). Estudo Hidrogeológico Detalhado do Sistema Aquífero do Vale de Nhartanda-Cidade de Tete e Plano de Ação, Tete. 48p.
52. BR (2004). Regulamento sobre a Qualidade da Água para o Consumo Humano. I SÉRIE - Número 37. Moçambique, 14p.
53. COBA (2012). Sistemas de Abastecimento de Água de Tete e Moatize. Plano Diretor e Projeto de Execução - Enquadramento Geológico e Recursos Hídricos Subterrâneos, Tete. 194p.
54. COBA (2013). Sistemas de Abastecimento de Água de Tete e Moatize. Plano Diretor e Projeto de Execução - Qualidade da Água Para Abastecimento. Tete. 37p.
55. DIREÇÃO NACIONAL DA ÁGUA (DNA) (1987). Carta Hidrogeológica de Moçambique, 1ª Ed, Maputo, Escala 1: 1.000 000.

56. FIPAG (2016 - 2017). Bolentins diários da secção de qualidade de água – Laboratório de Análises de Água, Tete.
57. INAM – Tete (2016). Resumo de Médias Mensais do Ano de 2016 a Março de 2018 – Tete.
58. PROFURO INTERNACIONAL LIMITADA (2012). Drilling Boreholes in Tete and Moatize.
59. WE CONSULT (2009). Groundwater Assessment Study For The Extension Of The Wellfield For The Town Water Supply Of Tete. Mozambique. 89p.
60. WE CONSULT (2016). Estudo Hidrogeológico detalhado para Monitorização do sistema aquífero do Vale de Nhartanda–Cidade de Tete - Relatório sobre o Plano da Rede de Monitoramento do Sistema Aquífero, Tete. 64p.

Anexos

Anexo 2.1: Classes de Vulnerabilidade EPPNA, IS e BÓS (BÓS & THOMÉ, 2012).

Definição	Classe (EPPNA)
V1: Aquíferos em rochas carbonatadas de elevada carsificação	Alta
V2: Aquíferos em rochas carbonatadas de carsificação média a alta	Média a alta
V3: Aquíferos em sedimentos não consolidados com ligação hidráulica com a água superficial	Alta
V4: Aquíferos em sedimentos não consolidados sem ligação hidráulica com a água superficial	Média
V5: Aquíferos em rochas carbonatadas	Média e variável
V6: Aquíferos em rochas fissuradas	Baixo e variável
V7: Aquíferos em sedimentos consolidados	Baixo e variável
V8: Inexistência de aquíferos	Muito baixo

Índice IS	Classe	Índice BÓS
85 – 100	Muito alta	>219
65 – 85	Alta	179 < 219
45 – 65	Intermédia	120 < 179
0 – 45	Baixa	< 120

Anexo 2.2. Métodos de avaliação da vulnerabilidade (Adaptado de AUGÉ (2008); ALMEIDA *et al*, (2006); ARTUSO *et al* (2002); FOSTER *et al*, (2006); BÓS & THOMÉ, (2012), FEITOSA & FILHO (2008); CHACHADI & LOBO (2005).

Método	Avaliação	Fatores	Referência
VULTRAC	Vulnerabilidade geral	Intensidade de fraturação e Profundidade do nível estático	FERNANDES & HIRATA (S/D)
GALDIT	Vulnerabilidade Específica (intrusão salina)	Ocorrência de aquíferos, Condutividade hidráulica, Nível piezométrico, Distância à linha de costa, Impacto da existência de fenómenos de intrusão salina e espessura do aquífero.	CHACHADI & LOBO-FERREIRA (2005)

ΔHT'	Vulnerabilidade em aquífero semiconfinado	Potencial hidráulico e transmissividade vertical.	AUGE (2001)
EPIK	Vulnerabilidade geral	Carsificação superficial, cobertura de proteção, infiltração e rede cársica.	DOERFLIGER; ZWAHLEN (1997)
Saneamento In Situ	Vulnerabilidade e saneamento <i>in situ</i>	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade e qualidade da água.	FERREIRA; HIRATA (1993)
Groundwater Vulnerability Map For Nitrate	Potencial de lixiviação de nitrato	Tipo de solo, características hidráulicas e litologia do aquífero.	CARTER <i>et al.</i> (1987)
IPN	Vulnerabilidade	Fertilização com azoto; Recarga; Textura do solo e Profundidade do nível freático.	RAMOLINO (1986)
Índice de Pesticidas	Pesticidas, uso normal.	Características físico-químicas de pesticidas, Clima, Perfil do solo e Cultura.	RAO <i>et al.</i> (1985)
Landfill Site Ranking	Aterros sanitários	Distância aterro/poço, gradiente, permeabilidade e capacidade de atenuação.	LE GRAND (1983)
Brine Disposal Methodology	Águas de formação em campos de petróleo e gás; Vulnerabilidade específica.	Método de disposição, Volume, Geologia, Densidade de poços de Petróleo, Proximidade de poços de água.	WESTERN MICHIGAN UNIVERSITY (1981)
Sistema de Classificação de Ameaças	Áreas prioritárias para limpeza do aquífero	Migração- característica do meio e residuo, Quantidade de produto, população próxima, Exploração e fogo e Contato direto.	CALDWELL <i>et al.</i> (1981)

TPE	Áreas de risco de contaminação	Velocidade da água subterrânea, Porcentagem de argila, Atividade potencialmente contaminante, Exploração dos aquíferos.	SILVA <i>et al.</i> (1980)
Waste-Soil Interaction Matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos	Efeitos na saúde, características e comportamento do produto, capacidade de atenuação do solo, hidrografia.	PHILIPS <i>et al.</i> (1977)
Surface Impoundment Assessment	Disposição de águas Servidas	Zona não saturada, importância da recarga, qualidade da água e periculosidade do material.	LE GRAND (1964)

Anexo 2.3: Índices dos parâmetros DRASTIC

2.3.1: Parâmetro: D (Zona não saturada)

Profundidade (m)	Índices
<1.5	10
1.5 - 5	9
5 - 10	7
10 - 15	5
15 - 23	3
23 - 30	2
30 +	1

2.3.2: Parâmetro: R (Recarga)

Recarga (mm)	Índices
0 - 50	1
50 - 100	3
100 - 180	6
180 - 255	8
255+	9

2.3.3: Parâmetro: A (Material do Aquífero)

Material do Aquífero	Índices	Índice Típico
Argiloso	1 - 3	2
Metamórfico/ígneo	2 - 5	3
Metamórfico/ígneo alterado	3 - 5	4
Arenito, calcário argiloso estratificado.	5 - 9	6
Arenito maciço	4 - 9	6
Calcário maciço	4 - 9	6
Areia	4 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Calcário carsificado	9 - 10	10

2.3.4: Parâmetro: S (Tipo de solo)

Tipo de Solo	Índices
Fino ou ausente	10
Saibro/Cascalho	10

Areia	9
Turfa	8
Argila expansiva e/ou agregada	7
Franco arenoso	6
Franco Siltoso	4
Franco Argiloso	3
Calcário	2
Argila Não-Fragmentada e Não-agregada	1

2.3.5: Parâmetro: T (Topografia)

Topografia (%)	Índices
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
18 +	1

2.3.6: Parâmetro: I (impacto da zona vadosa)

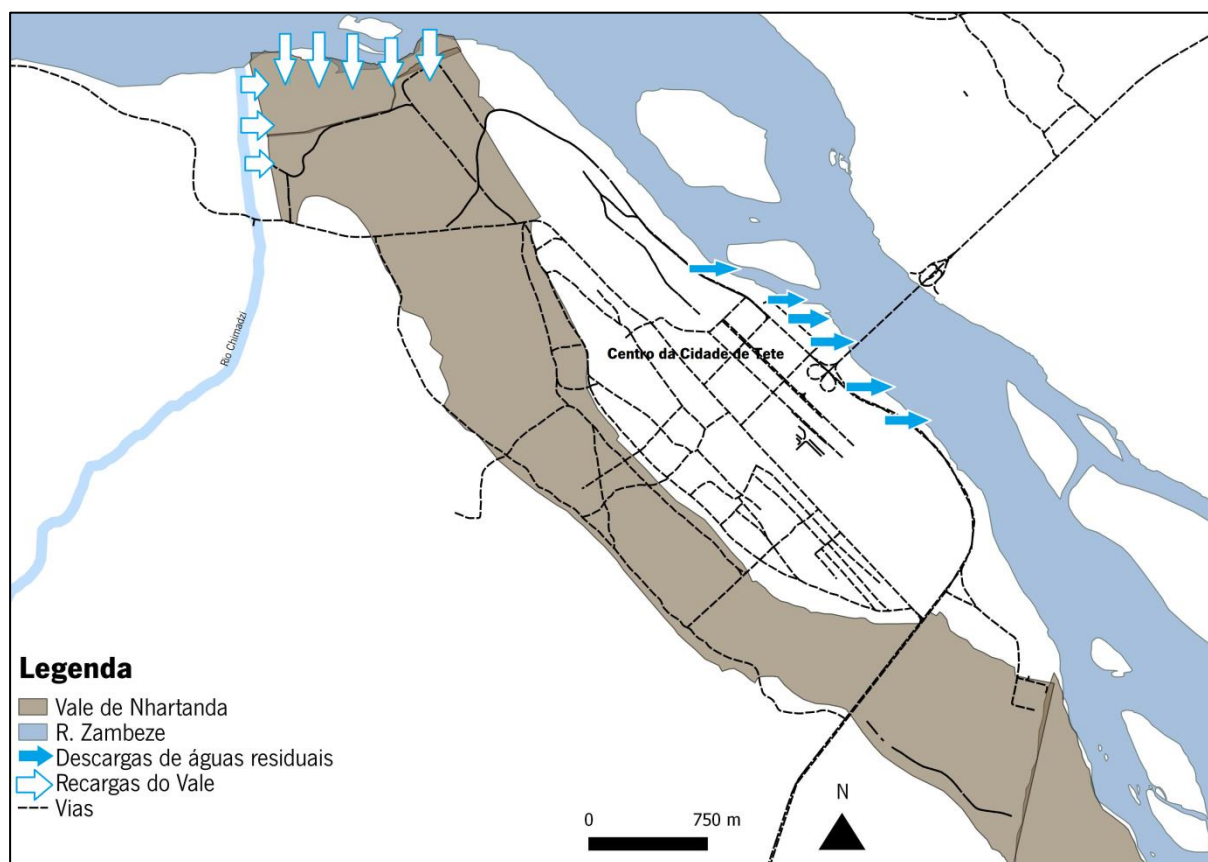
Intervalos	Índices	Índices Típicos
Camada confinante	1	1
Silte/Argila	2 - 6	3
Folhelho argiloso argelito	3-5	3
Calcário	2 - 7	6

Arenito	4 - 8	6
Arenito	4 - 8	6
Calcário e argelito		
Rocha Metamórfica	2 - 8	4
Basalto	2 - 10	9
Calcário carsificado	9 - 10	10

2.3.7: Parâmetro: C (Condutividade hidráulica)

Intervalo (m/dia)	Índices
< 4.1	1
4.1 – 12.2	2
12.2 – 28.5	4
28.5 – 40.7	6
40.7– 81.5	8
>81.5	10

Anexo 3.1: Recarga do Vale de Nhartanda e Descargas de águas residuais (adaptado de COBA 2012 e CMC – Tete).

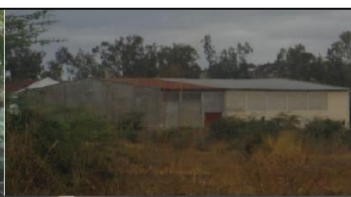


Anexo 3.2: Interdição de construção



Anexo 3.3: Atividades ao longo do Vale de Nhartanda e áreas adjacentes (fontes de Poluição).





Anexo 4.1: Sonda elétrica



Anexo 4.2: Multiparamétrico HANNA



Anexo 4.3: Malas térmicas com amostras



Anexo 4.4a): Multiparâmetro portátil Hach



Anexo 4.4b): Espectrofotômetro HANNA



Anexo 4.5: Log. de Sondagem (Média) (PIL, 2012).

